

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 67, № 1
2024

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредитель

Министерство образования Республики Беларусь

Журнал включен в базы данных:
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ,
ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Румянцев Ю. В., Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю.** Быстродействующий метод определения амплитуды сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и управления при колебаниях частоты 5
- Секацкий Д. А., Попкова Н. А.** Расчет и анализ удельных потерь активной мощности на коронирование в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических данных 16

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Кулаков Г. Т., Воюш Н. В.** Структурно-параметрическая оптимизация регуляторов впрысков паровых котлов 33
- Ярмольчик Ю. П., Шрёгер Р., Хаберфельнер Х., Пихлер М., Костич Д., Мороз Г. В.** Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 3 50
- Сухоцкий А. Б.** Определение максимальной пропускной способности регулирующего клапана в системах теплоснабжения 66

ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКИ

- Сайтов С. Р., Чичирова Н. Д., Филимонова А. А., Карницкий Н. Б.** Прогнозирование часов пик энергопотребления региональных энергосистем 78

ИНФОРМАЦИЯ

- Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси объявляет конкурс 2024 года на соискание премий имени академика А. В. Лыкова 92

Главный редактор Александр Михайлович Маляревич

Редакционная коллегия

- В. ВУЙЦИК* (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),
К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
П. В. ЖУКОВСКИИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ИВАШЕЧКИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
Ф. А. РОМАНИЮК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
В. Ю. РУМЯНЦЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),
В. А. СЕДНИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),
В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),
Г. Н. УЗАКОВ (Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Республика Узбекистан),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (РУП «Белинвестэнерго», Минск, Республика Беларусь)

Ведущий научный редактор В. Н. Гурьянчик

**Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 28 февраля 2019 г.
Регистрационный номер 1257**

Подписано к печати 31.01.2024. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 7,42. Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2024. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, Республика Беларусь, пр. Независимости, 65.
Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327.
Тел.: +375 17 320-65-14
e-mail: energy@bntu.by; <http://energy.bntu.by>

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 3820000006896 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2024

ISSN 1029-7448 (Print)
ISSN 2414-0341 (Online)

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 67, No 1
2024

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founder

Ministry of Education of the Republic of Belarus

The Journal is included in the following databases:
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC,
Lan, CyberLeninka, Socionet

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu.** A Fast-Response Method for Determining the Amplitude of a Signal in Microprocessor Automation and Control Systems with Frequency Fluctuations 5
- Sekatski D. A., Papkova N. A.** Calculation and Analysis of Specific Losses of Active Power in Overhead Power Lines due to Corona in View of Climatic Data 16

HEAT POWER ENGINEERING

- Kulakov G. T., Voyush N. V.** Structural and Parametric Optimization of Steam Boiler Injection Regulators 33
- Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Haberfelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V.** Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 3 50
- Sukhotski A. B.** Determining of the Maximum Throughput of Control Valve in Heat Supply Systems 66

POWER ENGINEERING ECONOMICS

- Saitov S. R., Chichirova N. D., Filimonova A. A., Karnitsky N. B.** Forecasting Peak Hours for Energy Consumption in Regional Power Systems 78

INFORMATION

- The A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus announces the 2024 competition for prizes named after Academician A.V. Lykov 92

Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich

Editorial Board

- W. T. WÓJCIK* (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
V. V. GALAKTIONOV (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation),
M. DADO (Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic),
K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
P. W. ZHUKOWSKI (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
V. V. IVASHECHKIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A. S. KALINICHENKO (Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus),
A. KONNOV (Lund University, Sweden),
K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),
A. A. MIKHALEVICH (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
NGO TUAN KIET (Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
E. N. PISMENNYI (National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine),
F. A. ROMANIUK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. Yu. RUMLIANTSEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A.-S. S. SAUHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),
V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),
V. A. SEDNIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
B. S. SOROKA (The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine),
V. A. STROEV (National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation),
E. V. TOROPOV (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),
G. N. UZAKOV (Karshi Engineering Economic Institute, Karshi, Republic of Uzbekistan),
B. M. KHROUSTALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
L. V. SHENETS (RUE “Belinvestenergosberezhenie”, Minsk, Republic of Belarus)

Lead Science Editor V. N. Guryanchyk

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2019, February, 28th
Reg. No 1257**

Passed for printing 31.01.2024. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,5.
An edition of 100 copies. Date of publishing 2024. Order list .

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 320-65-14
e-mail: energy@bntu.by; <http://energy.bntu.by>

Printed in BNTU. License LP 3820000006896 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-5-15>

УДК 621.316.925

Быстродействующий метод определения амплитуды сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и управления при колебаниях частоты

Ю. В. Румянцев¹⁾, Ф. А. Романюк¹⁾, В. Ю. Румянцев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В микропроцессорных системах автоматизации и управления в качестве информационных параметров контролируемых величин широко используются амплитудные (действующие) значения основной гармоники входных сигналов. Наиболее часто они определяются по выборкам одной или пары ортогональных составляющих сигнала, для формирования которых преимущественно применяются цифровые фильтры Фурье и их модификации. При номинальной частоте в энергосистеме указанные фильтры обеспечивают достоверное получение амплитуды сигнала без дополнительной погрешности. В случае отклонения частоты от номинальной количество выборок за период сигнала не является целым числом и дискретизация становится асинхронной. Вследствие этого в амплитуде сигнала появляется соответствующая погрешность, а ее изменение приобретает колебательный характер. При незначительных колебаниях частоты в нормальном режиме погрешность амплитуды незначительна. Однако в аномальных ситуациях частота может иметь значительные вариации. При этом в критических ситуациях не исключены отказ систем автоматизации и управления, а также некорректная работа их функциональных алгоритмов. Известные методы определения амплитуды сигнала при колебаниях частоты обеспечивают решение имеющейся проблемы, однако отличаются невысоким быстродействием. Предлагаемый быстродействующий метод определения амплитуды при колебаниях частоты ориентирован на использование в качестве исходной информации выборок мгновенных значений косинусной ортогональной составляющей сигнала, которые формируются с помощью соответствующего цифрового фильтра Фурье. По указанным выборкам рассчитываются динамические косинус и синус угла одной выборки, использование которых при вычислении амплитуды обеспечивает ее независимость от частоты. Обработка полученной амплитуды усилительным элементом с нелинейным коэффициентом позволяет достичь приемлемого быстродействия. Оценка эффективности предложенного решения выполнялась методом вычислительного эксперимента с помощью цифровой модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink. В качестве тестовых воздействий при этом использовались как синусоидальные входные сигналы, так и сложные, приближенные к реальным вторичным сигналам измерительных трансформаторов. В результате исследований установлено, что предлагаемый метод определения амплитуды при колебаниях частоты

Адрес для переписки

Румянцев Владимир Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 326-89-51
vrumiantsev@bntu.by

Address for correspondence

Rumiantsev Vladimir Yu.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 326-89-51
vrumiantsev@bntu.by

имеет быстродействие на уровне четверти периода и обеспечивает эффективное устранение частотной погрешности как в нагрузочных режимах, так и в режимах повреждений.

Ключевые слова: микропроцессорные системы автоматизации и управления, амплитуда, частота, колебания, модель, тестовое воздействие, вычислительный эксперимент, MATLAB-Simulink

Для цитирования: Румянцев, Ю. В. Быстродействующий метод определения амплитуды сигнала в микропроцессорных системах автоматизации и управления при колебаниях частоты / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 67, № 1. С. 5–15. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-1-5-15>

A Fast-Response Method for Determining the Amplitude of a Signal in Microprocessor Automation and Control Systems with Frequency Fluctuations

Yu. V. Rumiantsev¹⁾, F. A. Romaniuk¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In microprocessor automation and control systems, the amplitude (effective) values of the fundamental harmonic of the input signals are widely used as information parameters of the controlled quantities. They are most often determined by samples of one or a pair of orthogonal components of the signal, for the formation of which digital Fourier filters and their modifications are mainly used. At the rated frequency in the power system, these filters ensure reliable reception of the signal amplitude without additional error. If the frequency deviates from the rated one, the number of samples per signal period is not an integer and the discretization becomes asynchronous. As a result, a corresponding error appears in the amplitude of the signal, and its change becomes oscillating. With minor frequency fluctuations in the normal mode, the amplitude error is insignificant. However, in abnormal situations, the frequency can have significant variations. At the same time, in critical situations, failure of automation and control systems, as well as incorrect operation of their functional algorithms, cannot be excluded. Known methods for determining the amplitude of a signal with frequency fluctuations provide a solution to the existing problem, but they are characterized by a slow response. The proposed high-response method for determining the amplitude during frequency fluctuations is focused on using as initial information samples of instantaneous values of the cosine orthogonal component of the signal, which are formed using an appropriate digital Fourier filter. Based on these samples, the dynamic cosine and sine of the angle of one sample are calculated, the use of which in calculating the amplitude ensures its independence from frequency. Processing of the received amplitude with an amplifying element with a nonlinear coefficient makes it possible to achieve acceptable performance. The effectiveness of the proposed solution was evaluated by a computational experiment using a digital model implemented in the MATLAB-Simulink dynamic modeling environment. In this case, both sinusoidal input signals and complex ones, close to the real secondary signals of measuring transformers, were used as test actions. As a result of the research, it was found that the proposed method for determining the amplitude during frequency fluctuations has a performance at the level of a quarter of the period and provides effective elimination of frequency error both in load modes and in damage modes.

Keywords: microprocessor automation and control systems, amplitude, frequency, oscillations, model, test action, computational experiment, MATLAB-Simulink

For citation: Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu. (2024) A Fast-Response Method for Determining the Amplitude of a Signal in Microprocessor Automation and Control Systems with Frequency Fluctuations. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (1), 5–15. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-5-15> (in Russian)

Введение

В микропроцессорных системах автоматизации и управления в качестве информационных параметров контролируемых величин достаточно часто выступают амплитудные (действующие) значения основной гармоники входных сигналов [1]. Преимущественно они определяются по выборкам одной или пары ортогональных составляющих (ОС) указанной гармоники [2]. В сложившейся практике для выделения ОС наиболее широко используются нерекурсивные цифровые фильтры (ЦФ) Фурье и их модификации [3].

При номинальной частоте в энергосистеме ЦФ Фурье обеспечивает достоверное определение амплитуды сигнала без дополнительной погрешности. В случае отклонения частоты от номинальной количество выборок за период сигнала не является целым числом и дискретизация становится асинхронной [4]. Вследствие этого в амплитуде сигнала появляется соответствующая погрешность.

На рис.1 показана оценка амплитуды при использовании для ее определения ЦФ Фурье с частотой дискретизации 1200 Гц.

При отклонении частоты от номинальной 50 Гц в пределах ± 5 Гц амплитуда сигнала изменяется и находится в области, ограниченной минимальными (кривая 1) и максимальными (кривая 2) значениями (рис. 1а). Изменение амплитуды сигнала с частотой 48 Гц, отличной от номинальной 50 Гц, представлено на рис. 1б. Из данного рисунка видно, что амплитуда колеблется в пределах от минимального до максимального значений с удвоенной частотой (период T_{50} сигнала номинальной частоты в два раза больше периода колебаний амплитуды T). Это же наблюдается и при других частотах сигнала.

Следует отметить, что по обсуждаемому вопросу проведены полезные и всесторонние исследования, результаты которых представлены в [5].

Из приведенных на рис. 1 зависимостей можно сделать вывод, что при незначительных колебаниях частоты в энергосистеме, имеющих место в нормальном режиме, погрешность амплитуды незначительна, и на практике с ней можно не считаться. Однако в аномальных ситуациях частота может иметь значительные вариации. Такие режимы должны предотвращаться системами автоматизации и управления, которые обеспечивают возврат колебаний частоты в допустимые пределы. Однако в критических случаях не исключен их отказ в срабатывании. Кроме того, при значительных отклонениях частоты от номинальной многие из функциональных алгоритмов систем автоматизации и управления будут работать некорректно.

Предотвращение изменений амплитуды сигнала при уходе частоты может быть достигнуто за счет реализации соответствующих операций с выборками амплитудных значений синусной и косинусной ОС Фурье, как это сделано в [6]. Частичную коррекцию амплитудной погрешности можно обеспечить путем обработки выборок амплитуды ЦФ скользящего среднего [7].

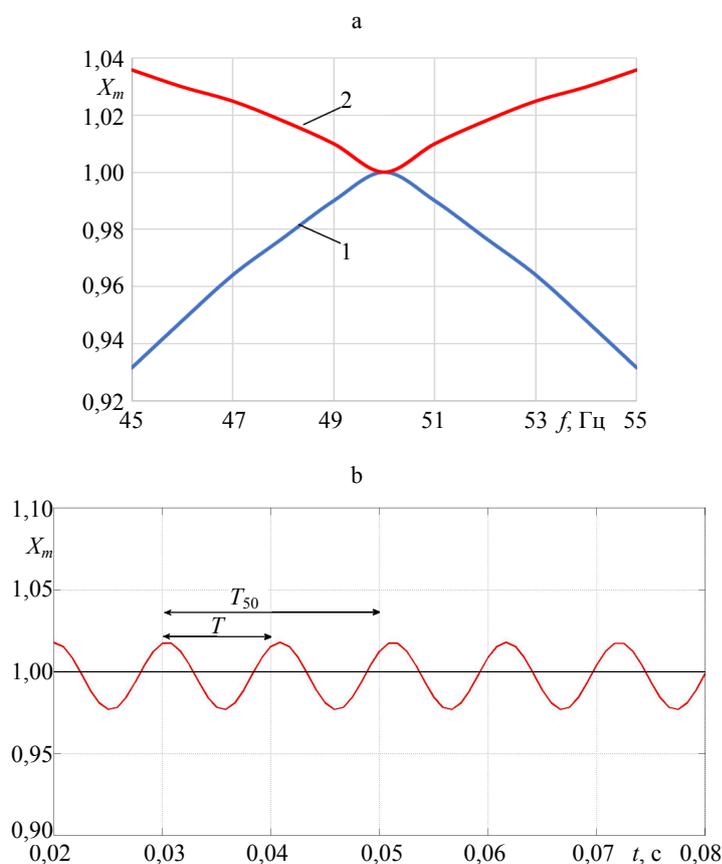


Рис. 1. Погрешность определения амплитуды сигнала, обусловленная отклонением частоты от номинальной при использовании ЦФ Фурье с частотой дискретизации 1200 Гц:

а – оценка амплитуды при отклонении частоты от -5 до 5 Гц;

б – изменение амплитуды сигнала с частотой 48 Гц, отличной от номинальной 50 Гц

Fig. 1. Error in determining the amplitude of the signal due to a frequency deviation from the nominal one when using the Fourier digital filters with a sampling frequency of 1200 Hz: а – estimation of the amplitude with a frequency deviation from -5 to 5 Hz; б – change in the amplitude of the signal with a frequency of 48 Hz which is other than the rated one of 50 Hz

При этом следует отметить, что упомянутые методы определения амплитуды сигнала обеспечивают возможность достоверных измерений после изменения режима по истечении времени, равного одному периоду номинальной частоты и более. Использование известных модификаций ЦФ Фурье позволяет сократить указанное время в лучшем случае до половины периода.

Основная часть

Предлагаемый быстродействующий метод определения амплитуды при колебаниях частоты ориентирован на использование в качестве исходной

информации выборок мгновенных значений косинусной ОС сигнала, которые формируются с помощью соответствующего ЦФ Фурье. По указанным выборкам рассчитываются динамические косинус и синус наиболее вероятного угла одной выборки, использование которых при вычислении амплитуды обеспечивает ее независимость от частоты [8].

Обработка полученной амплитуды усилительным элементом с нелинейным коэффициентом, называемым корректирующим, позволяет достичь приемлемого быстродействия [9]. При этом основу предлагаемого метода определения амплитуды составляет выполнение следующих вычислительных операций.

Путем реализации функции косинусного нерекурсивного ЦФ по выборкам входного сигнала x_n формируется соответствующая ОС основной частоты

$$x_{cn} = \sum_{n=1}^N a_{cn} x_n, \quad (1)$$

где N – число выборок сигнала в окне наблюдения; n – номер выборки сигнала; a_{cn} – коэффициенты косинусного ЦФ.

По трем смежным выборкам косинусной ОС x_{cn} , $x_{c(n-1)}$, $x_{c(n-2)}$ вычисляется динамический косинус вероятного угла одной выборки с использованием выражения [10]

$$\cos(\omega\Delta t)_n = \frac{x_{cn} + x_{c(n-2)}}{2x_{c(n-1)}}. \quad (2)$$

Если на расчетном шаге n величина $x_{c(n-1)}$ близка к нулю, что определяется выполнением условия $\frac{|x_{c(n-1)}|}{X_{m(n-1)*}} < x_{*\min}$, где $X_{m(n-1)*}$ – амплитуда Фурье

на предыдущем шаге; $x_{*\min}$ – относительное минимальное значение выборки сигнала, то $\cos(\omega\Delta t)_n$ не вычисляется, а ему присваивается значение с предыдущего шага, в противном случае осуществляется проверка на наличие выбросов. Выбросы фиксируются по выходу $\cos(\omega\Delta t)_n$ за пределы диапазона, граничные значения которого устанавливаются заданными частотами. При обнаружении выбросов $\cos(\omega\Delta t)_n$ присваивается значение, равное $\cos \frac{2\pi}{N}$. Затем вычисляется динамический синус вероятного угла

одной выборки с учетом, что всегда $\omega\Delta t < \frac{\pi}{2}$

$$\sin(\omega\Delta t)_n = \sqrt{1 - \cos^2(\omega\Delta t)_n}. \quad (3)$$

Амплитуда сигнала определяется по текущим x_{cn} и предыдущим $x_{c(n-1)}$ выборкам косинусной ОС, зафиксированным через шаг дискретизации с использованием известного выражения

$$X_{mn} = \frac{\sqrt{x_{cn}^2 - 2x_{cn}x_{c(n-1)}C + x_{c(n-1)}^2}}{S}, \quad (4)$$

где C, S – соответственно косинус и синус угла одной выборки.

При вычислении по (4) амплитуды Фурье X_{mnf} значения косинуса и синуса задаются жестко равными: $C = \cos \frac{2\pi}{N}$; $S = \sin \frac{2\pi}{N}$.

Независимая от колебаний частоты амплитуда X_{mns} вычисляется по (4) с использованием динамических косинуса и синуса в соответствии с (2), (3): $C = \cos(\omega\Delta t)_n$; $S = \sin(\omega\Delta t)_n$.

Быстродействующее формирование результирующей амплитуды сигнала X_{mnr} осуществляется путем умножения X_{mns} на корректирующий коэффициент k_{kn} [11, 12]

$$X_{mnr} = k_{kn} X_{mns}. \quad (5)$$

Теоретические предпосылки для определения указанного коэффициента приведены в [13], а основанное на них выражение для k_{kn} имеет вид

$$k_{kn} = m \left(\frac{X_{mnd}}{X_{mnf}} - \frac{X_{mnf}}{X_{mnd}} \right) + 1, \quad (6)$$

где $X_{mnd} = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{n=1}^N x_n^2}$ – амплитуда входного сигнала; m – задаваемый параметр, с помощью которого можно изменять быстродействие формирования амплитуды.

Организация и проведение вычислительного эксперимента

Оценка работоспособности и эффективности функционирования предлагаемого быстродействующего метода определения амплитуды сигнала при колебаниях частоты выполнялась методом вычислительного эксперимента с использованием модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems [14]. В ее структуре содержатся отдельные блоки моделей энергосистемы, трехфазной группы трансформаторов тока (ТТ), нагрузки и блока короткого замыкания. Модель позволяет формировать тестовые воздействия в форме как синусоидального сигнала, так и сигнала, приближенного к реальному вторичному току измерительного ТТ при коротком замыкании (КЗ), сопровождающемся понижением частоты. Особенности моделирования представленных блоков и элементов цифровой структуры подробно рассмотрены в [1].

Модель, реализующая предлагаемый частотно-независимый метод формирования амплитуды сигнала, представлена на рис. 2. Она содержит четыре подсистемы, каждая из которых выполняет одну или несколько из рассмотренных выше операций и состоит из стандартных блоков библиотеки MATLAB-Simulink. Входные и выходные порты подсистем на рис. 2 имеют такие же обозначения, как и в приведенных выше выражениях (1)–(6).

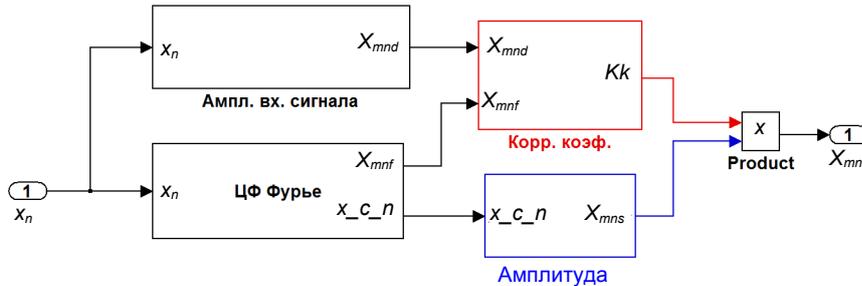


Рис. 2. Структура модели частотно-независимого метода формирования амплитуды сигнала

Fig. 2. The structure of the model of the frequency-independent method of signal amplitude formation

В подсистеме «ЦФ Фурье» по выражению (1) определяется косинусная x_{cn} ОС, а также амплитуда X_{mnf} основной гармоники входного сигнала x_n . Амплитуда входного сигнала X_{mnd} вычисляется в одноименной подсистеме «Ампл. вх. сигнала».

Значение корректирующего коэффициента k_{kn} определяется в соответствующей подсистеме по результатам расчета значений X_{mnf} , X_{mnd} и m по выражению (6).

Независимая от колебаний частоты амплитуда X_{mns} формируется в подсистеме «Амплитуда» согласно выражениям (2)–(4).

Формирование быстродействующей результирующей амплитуды X_{mnr} по выражению (5) производится путем перемножения на каждом шаге расчета выходных сигналов подсистем «Амплитуда» и «Корр. коэф.».

Результаты исследования

Для сравнительной оценки эффективности разработанного метода получены численные значения амплитуды при различных формах тестовых воздействий для режимов отклонений частоты от номинальной, изменений амплитуды, а также при одновременных их вариациях в заданные моменты времени. Соответствующие зависимости, позволяющие дать оценку предлагаемому методу определения амплитуды сигнала в различных режимах, представлены на рис. 3–5. Там же приведены аналогичные зависимости для амплитуды Фурье.

Необходимо отметить, что в результате выполненных исследований найдены оптимальные значения параметра m в (6) по критерию минимизации перерегулирования при наступлении переходного режима, которые находятся в диапазоне 1,2 – 1,5.

На рис. 3 показаны оценки амплитуды при синусоидальном сигнале (кривая 1) для вариантов определения предложенным методом (кривая 2) и методом Фурье (кривая 3).

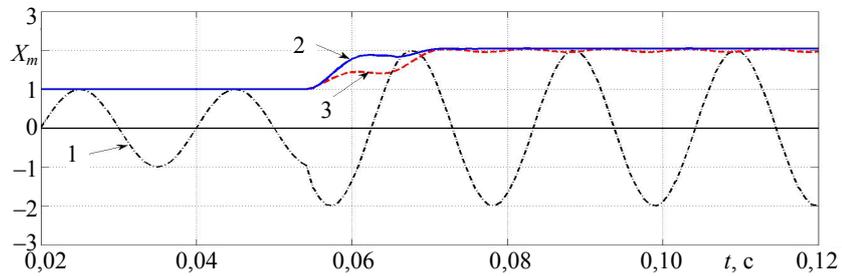


Рис. 3. Оценки амплитуды сигнала при набросе нагрузки со снижением частоты до 48 Гц

Fig. 3. Estimates of the amplitude of the signal when the load is surged with a decrease in frequency to 48 Hz

На отрезке времени $t = 0,020\text{--}0,055$ с имеет место нормальный установившийся режим входного сигнала 1 с номинальной частотой 50 Гц. Амплитуда, полученная разработанным методом (кривая 2), и амплитуда Фурье (кривая 3) в этом случае полностью совпадают. В момент времени $t = 0,055$ с происходит резкий наброс нагрузки с одновременным снижением частоты до 48 Гц, в результате чего возникает переходный режим, который длится в течение порядка периода номинальной частоты, после чего наступает новый установившийся режим. При этом время определения амплитуды с погрешностью, не превышающей $\pm 5\%$ установившегося значения, предложенным методом находится на уровне четверти периода номинальной частоты, а получение амплитуды Фурье занимает около периода указанной частоты. Из рис. 3 видно, что разработанный метод обеспечивает устранение колебаний амплитуды при уходе частоты от номинального значения, чего не наблюдается для амплитуды Фурье. Следует отметить, что подобным образом протекают процессы при резком сбросе нагрузки и подъеме частоты сигнала выше номинальной.

Проведенные исследования по оценке амплитуды предложенным методом в других нагрузочных режимах с колебаниями частоты показывают, что он отличается адаптивностью к изменениям частоты и обладает достаточно высоким быстродействием.

Степень снижения частоты при коротких замыканиях определяется длительностью их существования и возникающим дефицитом мощности, наибольшая величина которого будет иметь место в сетях 110 кВ и выше. Принимая во внимание, что указанные сети оснащены быстродействующими защитами от КЗ, частота в этих режимах не будет успевать снижаться существенно. Однако с возможностью значительного снижения частоты при КЗ необходимо считаться из-за наброса активной мощности вследствие роста потерь в маломощных изолированных энергосистемах с реактивными кабельными линиями.

В этой связи оценка возможности использования предложенного метода для получения амплитуды при КЗ со снижением частоты представляет определенный интерес.

На рис. 4 представлены оценки амплитуды при близком к реальному вторичном токе в режиме КЗ (кривая 1) для вариантов определения разработанным методом (кривая 2) и методом Фурье (кривая 3).

На отрезке времени $t = 0,05\text{--}0,10$ с существует нормальный установившийся режим с частотой 50 Гц, в котором амплитуды, полученные обоими методами, совпадают (кривые 2, 3).

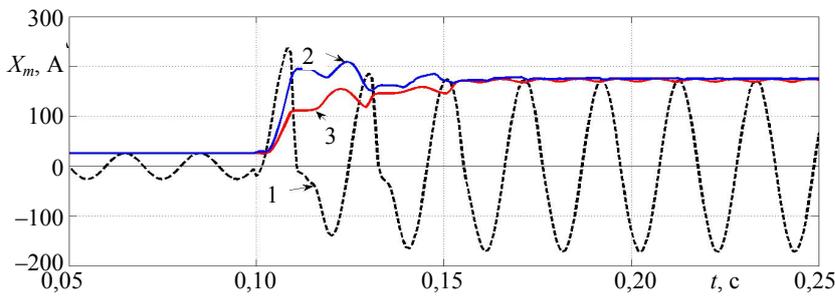


Рис. 4. Оценки амплитуды сигнала при КЗ со снижением частоты до 48 Гц

Fig. 4. Estimates of the amplitude of the signal at short circuit with a decrease in frequency to 48 Hz

В момент времени $t = 0,1$ с возникает КЗ со снижением частоты до 48 Гц, переходный режим которого длится около 2,5 периода номинальной частоты, после чего наступает установившийся режим КЗ. Из рис. 4 видно, что на различных участках определение амплитуды предложенным методом (кривая 2) осуществляется в 2–4 раза быстрее, чем методом Фурье (кривая 3). При этом в установившемся режиме КЗ разработанный метод устраняет колебания амплитуды, чего не происходит с амплитудой Фурье.

Для сравнительной оценки поведения рассматриваемых методов получены численные значения амплитуды, определяемой каждым из них, при КЗ с номинальной частотой 50 Гц. На рис. 5 показаны оценки амплитуды при близком к реальному вторичном токе (кривая 1) для вариантов ее нахождения предложенным методом (кривая 2) и методом Фурье (кривая 3).

Из рис. 5 видно, что в рассматриваемом режиме амплитуда X_{mns} (кривая 4), используемая в процессе реализации предложенного метода в качестве промежуточной величины, практически полностью совпадает с амплитудой Фурье (кривая 3). Поскольку X_{mns} связана с результирующей амплитудой сигнала X_{mnr} простой зависимостью (5), осуществляемой посредством корректирующего коэффициента k_{kn} , сравниваемые методы в режиме КЗ с номинальной частотой будут одинаково реагировать на изменение амплитуды сигнала.

Основное различие между ними, как следует из рис. 5, находится во временной области. Предлагаемый метод определения амплитуды имеет более высокие динамические свойства в сравнении с методом, основанным на ее вычислении с использованием исключительно положений Фурье.

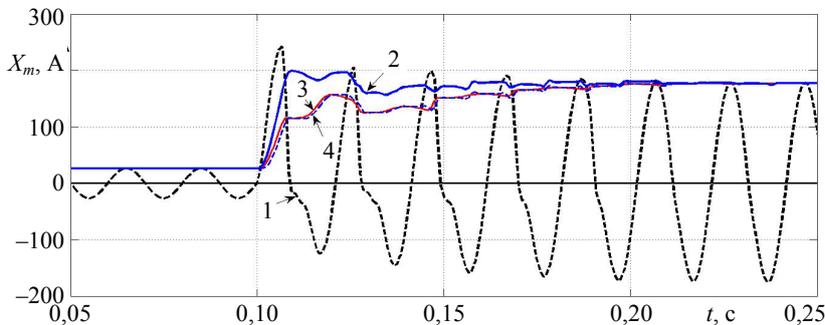


Рис. 5. Оценки амплитуды сигнала при КЗ с номинальной частотой 50 Гц

Fig. 5. Estimates of the amplitude of the signal at short circuit with a nominal frequency of 50 Hz

ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод определения амплитуды сигнала обеспечивает устранение колебаний ее расчетных значений при отклонении частот от номинальной в заданных пределах как в нагрузочных, так и в аварийных режимах работы.

2. Результаты выполненных исследований показали, что разработанный метод обладает повышенным быстродействием во всех реально возможных режимах электроустановки, что позволяет получать достоверные значения амплитуды сигнала после ее изменения за время порядка четверти периода номинальной частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
2. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
3. Фадке Арун, Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / Арун Г. Фадке, Джеймс С. Торп; пер. с англ. под ред. Г. С. Нудельмана. 2-е изд. М.: Техносфера, 2019. 370 с.
4. Обработка сигналов в интеллектуальных сетях энергосистем / Ф. Рибейро Пауло [и др.]. М.: Техносфера, 2020. 496 с.
5. Солопов, Р. В. Оценка погрешностей при работе фильтров Фурье в устройствах релейной защиты / Р. В. Солопов, В. С. Ковженкин, Л. В. Вайтеленко // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 10. С. 117–128. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-117-128>.
6. Снижение влияния изменений частоты на формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 42–54. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54>.
7. Романюк, Ф. А. Повышение устойчивости функционирования измерительных органов тока микропроцессорных защит / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев // Наука и техника, 2022. Т. 21, № 5. С. 419–425. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-419-425>.
8. Романюк, Ф. А. Способы формирования ортогональных составляющих входных сигналов для релейной защиты / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан, В. С. Каченя // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14>.
9. Романюк, Ф. А. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в цифровых измерительных органах защит с коррекцией динамических погрешностей / Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 4. С. 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-289-300>.
10. Принципы выполнения цифрового органа направления мощности в микропроцессорных токовых защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 4. С. 317–325. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-317-325>.
11. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108>.
12. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.
13. Цифровой измерительный орган тока релейной защиты электроэнергетической системы: пат. РФ №23972 / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев. Оpubл. 30.04.2023.
14. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.

Поступила 17.10.2023 Подписана в печать 19.12.2023 Опубликовано онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2021) *Testing of Microprocessor Current Protections: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, BNTU. 168 (in Russian).
2. Schneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
3. Phadke A.G., Thorp J.S. (2009) *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd ed. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 326. <https://doi.org/10.1002/9780470749722>.
4. Ribeiro P. F., Duque C. A., Silveira P. M. da, Cerqueira, A. S. (eds.) (2014) *Power Systems Signal Processing For Smart Grids*. John Wiley & Sons, Ltd. 417. <https://doi.org/10.1002/9781118639283>.
5. Solopov R. V., Kovzhenkin V. S., Vaitelenok L. V. (2018) Error Estimation under Fourier Filter Operation in Protective Relays. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 22 (10), 117–128 (in Russian). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-117-128>.
6. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A. (2020) Reducing the Impact of the Frequency Change on the Formation of Orthogonal Components of the Relay Protection Input Signals. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 42–54 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54>.
7. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2022) Improving of Functioning Stability of Current Measuring Elements in Microprocessor Protections. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 21 (5), 419–425 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-419-425>.
8. Romaniuk F. A., Loman M. S., Kachenya V. S. (2019) Methods of Forming Orthogonal Components of Input Signals for Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 5–14 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14>.
9. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. (2022) Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Digital Measuring Protection Elements with Correction of Dynamic Errors. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (4), 289–300 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-289-300>.
10. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A., Klimkovich P. I. (2023) Principles for Implementation of Digital Power Direction Control in Microprocessor Current Protections. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (4), 317–325 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-317-325>.
11. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Improvement of Algorithm for Formation of Orthogonal Components of Input Quantities in Microprocessor Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 95–108 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108>.
12. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2019) Technique of Performance Improvement of the Microprocessor-Based Protection Measuring Element. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 403–412 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.
13. Romanyuk F. A., Rumyantsev V. Yu., Rumyantsev Yu. V. (2023) *Digital Measuring Element of Relay Protection Current of an Electric Power System*. Patent Republic of Belarus. No 23972 (in Russian).
14. Chernykh I. V. (2011) *Simulation of Electrical Devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press; St. Petersburg, Peter. 288 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-16-32>

УДК 621.31+004.89+621.396.67.095.3

Расчет и анализ удельных потерь активной мощности на коронирование в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических данных

Д. А. Секацкий¹⁾, Н. А. Попкова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Корректное использование погодных данных для расчетов потерь активной мощности на коронирование в воздушных линиях (ВЛ) электропередачи весьма трудная задача. Одной из существенных причин этого являлась точность определения погодных условий и применение этого прогноза для расчета протяженных ВЛ. В СССР (Союз Советских Социалистических Республик) на основе натурных испытаний и экспериментальных данных были разработаны рекомендации по учету потерь электрической энергии на корону и помех в ВЛ электропередачи, средние значения которых приведены в действующей инструкции по нормированию и обоснованию норматива расхода электроэнергии на ее передачу по электрическим сетям. Согласно этому нормативному документу удельные расходы активной мощности на корону в воздушных линиях, усредненные по конструкции, определяются в зависимости от погодных условий, которые разделены на четыре группы. В данной работе оценено влияние потерь активной мощности на корону с использованием различных факторов на примере воздушных линий высокого напряжения основных электрических сетей различного номинального напряжения Республики Беларусь. Построены и смоделированы зависимости потерь активной мощности на коронирование с учетом разных климатических и погодных условий, наблюдаемых в стране. Определение метеорологических параметров основано на анализе погодных данных и закономерностей типов погодных условий. Для повышения точности расчета удельных потерь активной мощности на коронирование рассмотрены все возможные погодные условия, а также их сочетания, а в дальнейшем проведена их обработка и приведение к одному из четырех типов погоды. Предложен и представлен метод определения потерь электроэнергии на коронирование в ВЛ, основанный на среднестатистической относительной плотности воздуха и геометрических параметрах преобладающего участка ВЛ. Показано, что применение исключительно номинального напряжения может привести к погрешностям определения как удельного, так и фактического значения потерь активной мощности на коронирование.

Ключевые слова: удельные потери активной мощности, погодные условия, коронный разряд, напряженность электрического поля, линии электропередачи, электроэнергетическая система

Для цитирования: Секацкий, Д. А. Расчет и анализ удельных потерь активной мощности на коронирование в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических данных / Д. А. Секацкий, Н. А. Попкова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 1. С. 16–32. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-16-32>

Адрес для переписки

Секацкий Дмитрий Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 392-65-82
dsekatski@gmail.com

Address for correspondence

Sekatski Dzmitry A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosti Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 392-65-82
dsekatski@gmail.com

Calculation and Analysis of Specific Losses of Active Power in Overhead Power Lines due to Corona in View of Climatic Data

D. A. Sekatski¹⁾, N. A. Papkova¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. It is a very challenging task to correctly use weather data to calculate the active power loss due to corona in overhead power lines. One of the significant reasons for this was the problem of accuracy of determining weather conditions and the use of the forecast for calculating extended overhead lines. In the USSR (Union of Soviet Socialist Republics), based on field tests and experimental data, recommendations were developed for accounting for losses of electric energy due to corona and interference in overhead lines, the average values of which were given in the relevant instruction for the regulation and justification of the norm of electricity consumption for its transmission over electric networks. According to this regulatory document, the specific cost of active power due to corona in overhead lines, averaged by design, was determined depending on weather conditions, which were divided into four groups. In this paper, the effect of active power losses on corona is estimated using various factors on the example of high-voltage overhead lines in the main electrical networks of the Republic of Belarus of various rated voltages. Dependences of active power losses due to corona have been constructed and modeled, taking into account different climatic and weather conditions observed in the country. The determination of metrological parameters was based on the analysis of weather data and patterns of types of weather conditions. In order to improve the accuracy of calculating the specific losses of active power due to corona, all possible weather conditions were considered, as well as their combinations. Afterwards, the data on weather conditions were processed and their types were reduced to one of the four existing types of weather. A method for determining electric power losses due to corona in overhead lines based on the average relative air density and geometric parameters of the predominant section of overhead lines has been proposed and presented. It is shown that the usage of exclusively rated voltage can cause errors in determining both the specific and actual values of active power losses for corona.

Keywords: specific losses of active power, weather conditions, corona, electric field strength, power lines, electric power system

For citation: Sekatski D. A., Papkova N. A. (2024) Calculation and Analysis of Specific Losses of Active Power in Overhead Power Lines due to Corona in View of Climatic Data. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (1), 16–32. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-16-32> (in Russian)

Введение

Уровень развития электроэнергетической отрасли страны напрямую определяет прогресс развития общества. Чем выше ступень развития общества, тем выше эффективность использования топливно-энергетических ресурсов.

Согласно данным Департамента по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь и отчетным данным ГПО «Белэнерго», величина технологического расхода электроэнергии в энергетической системе Республики Беларусь находится на уровне 8 %. Одной из составляющих этого расхода являются климатические потери в ВЛ 110–750 кВ, выявить которые позволяют различные методики, учитывающие погодные условия. Все методики расчета потерь электроэнергии на корону, применяемые на территории стран СНГ, основаны на данных практических экспериментов, проводимых в СССР

в 1970-е гг. Усредненные значения результатов указанных выше натуральных испытаний положены в основу Положения по нормированию расхода топливно-энергетических ресурсов на предприятиях, в учреждениях и организациях ГПО «Белэнерго» [1]. Согласно этому нормативному документу удельные расходы активной мощности на корону в воздушных линиях (ВЛ), усредненных по конструкции, определяются в зависимости от погодных условий (по данным четырех групп погоды Гидрометеоцентра). С целью автоматизации расчетов удельные потери активной мощности на корону, приведенные в табл. 1, используются программным комплексом DWRES.

Таблица 1

Удельные потери активной мощности на корону ВЛ, усредненные по конструкции фаз
Specific active power losses due to the crown of overhead lines,
averaged over the phase design

Номинальное напряжение, кВ	Удельные потери активной мощности на корону ВЛ, кВт/км, при погоде			
	хорошей	сухом снеге	дожде	изморози
750	4,20	16,55	60,00	122,5
500	2,30	8,80	29,00	76,0
330	0,90	3,90	13,00	28,8
220	0,30	1,10	3,00	12,0
110	0,03	0,12	0,35	1,2

Рассчитать точно величину потерь активной мощности на корону весьма трудно. Существенными причинами этого являются определение и учет параметров воздушных линий электропередачи (геометрические параметры (тип опоры), марка провода, стрела провеса провода, шаг расщепления, давление воздуха) и погодных условий.

Основная часть

Еще в 1912 г. Фрэнк Уильям Пик-младший, исследователь в области электричества сверхвысокого напряжения, заявил, что воздействие снежных осадков сильнее, чем воздействие любых других погодных условий. Натурные испытания на реальных линиях электропередачи в отдельных случаях подтверждали заявление Пика, а иногда нет. В настоящее время предпринято множество попыток найти некоторые количественные связи между атмосферными условиями и потерями активной мощности от короны [2, 3]. Было установлено, что для чистых сухих проводов линий электропередачи потери активной мощности на коронирование в установившихся режимах при частоте могут быть выражены соотношением вида, кВт:

$$P = k(U - U_0), \quad (1)$$

где k – постоянная; U – действующее напряжение между проводом и землей; U_0 – то же, соответствующее началу коронного процесса.

Потери активной мощности на коронирование происходят, если линейное напряжение превышает порог короны. Сама по себе проводящая область недостаточно велика, чтобы вызвать электрический пробой. Коронное напряжение визуального возникновения (видимая корона) больше, чем критическое напряжение короны, поскольку его формирование включает ионизацию и перевод электрона в возбужденное состояние.

Выбор уровня поддержания напряжения на линиях электропередачи определяется рядом причин, среди которых немаловажное значение имеет обоснование пропускной способности ВЛ, устойчивость электрической системы и экономичность возможных режимов работы.

В [4–6] анализируется эффект регулирования рабочего напряжения с целью снижения потерь мощности и энергии в электрических сетях. Для процесса регулирования напряжения с целью минимизирования потерь активной мощности и энергии в электроэнергетической системе необходимо определить потери в активном сопротивлении линии электропередачи, в том числе и от короны, а также выявить зависимость их изменения при изменении напряжения.

Коронный разряд, как известно, может возникнуть в пустотах изолятора, на проводнике или на границе между изолятором и проводником. Когда градиент напряжения превышает значение критического напряжения, молекулы воздуха, окружающие проводники линии электропередачи высокого напряжения, ионизируются (переходная газовая ионизация), что приводит к частичным разрядам.

По формулам Пика [2, 6–8] потери мощности из-за коронного разряда в условиях хорошей погоды можно выразить как:

$$P_{\text{кор.хп}} = \frac{F}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{R}{d}} \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}} - E_{\text{кр}} \right)^2 L \cdot 10^{-5} \left(\frac{\text{кВт}}{\text{км}} \text{ (на фазу)} \right); \quad (2)$$

$$E_{\text{кор.нач}} = D_{\text{кр}} \delta m_d R \log \left(\frac{d}{R} \right); \quad (3)$$

$$E_{\text{кор.нач}} = D_{\text{кр}} \delta m_v R \log \left(\frac{d}{R} \right) \left(\frac{1 + 0,3}{\sqrt{\delta R}} \right); \quad (4)$$

где F – константа, равная 243; $D_{\text{кр}}$ – критический градиент, для воздуха 21,2 кВ/см; m_d – коэффициент неравномерности для критического напряжения; m_v – коэффициент неравномерности напряжения возникновения видимой короны.

Коэффициент плотности воздуха δ в формулах (1)–(3) принят равным 1 при 25 °С и давлении 760 мм рт. ст. В условиях плохой погоды критическое напряжение $E_{\text{кр}}$ принимается в 0,8 раза выше значения в хорошую погоду.

В качестве примера производился расчет величины потерь активной мощности от коронного разряда для линии напряжением 110 кВ. Полученные по формулам Пика расчетные значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Пример расчета потерь активной мощности от коронного разряда по формуле Пика
для линии напряжением 110 кВ**

**The example of calculating active power losses due to a corona discharge
using Pick's formula for 110 kV power line**

Условное обозначение	Параметр	Расчетное значение
F	Фиксированная константа	243
$D_{кр}$	Критический градиент	21,2 кВ/см
m_d	Коэффициент неравномерности для разрушающего критического напряжения	0,85
m_v	Коэффициент неравномерности напряжения возникновения видимой короны	0,72
t	Температура окружающей среды	25 °С
P	Атмосферное давление	760
δ	Плотность воздуха	1
R	Радиус проводника	0,54 см
d	Расстояние между проводниками	300 см
f	Частота	50 Гц
V_L	Линейное напряжение	110 кВ
$E_{кор.нач}$	Критическое напряжение	55,98 кВ
$E_{кор.виз}$	Визуальное напряжение короны	67,71 кВ
L	Длина провода	100 км
$P_{кор.хп}$	Потери активной мощности на корону в хорошую погоду	3,1244 кВт
$P_{кор.пл.пог}$	Потери активной мощности на корону при плохой погоде	158,3 кВт

Если отношение фазного напряжения к критическому напряжению пробоя меньше значения 1,8, то для определения потерь активной мощности на коронный разряд используется формула Петерсона [3]

$$P_{кор.хп \text{ Петерсона}} = \frac{21 \cdot 10^{-6} f V^2 F}{\left(\log_{10} \left(\frac{D}{r} \right) \right)^2}. \quad (5)$$

Графическое сравнение видимого коронного разряда критического напряжения и визуального начального напряжения короны в зависимости от различных значений радиуса проводника показано на рис. 1. Радиус проводника прямо пропорционален как визуальному коронному напряжению, так и критическому значению напряжения.

На рис. 1 видно, что при увеличении радиуса проводника величины визуального и критического напряжений также повышаются.

Графическая зависимость величины потерь активной мощности на корону при хорошей погоде в зависимости от расстояния между проводниками показана на рис. 2. Если расстояние сделать достаточно большим, то потери активной мощности на коронный разряд могут практически отсутствовать, что требует дополнительного технико-экономического обоснования.

Использование усредненных значений удельных потерь на корону по номинальному напряжению не всегда эффективно отражает расчетную ве-

личину, поскольку они зависят от большого числа факторов. На рис. 3 показано, что повышение напряжения также увеличивает потери активной мощности на корону.

Рис. 1. Напряжение короны при различных радиусах проводника
Fig. 1. Corona voltage at different values of conductor radius

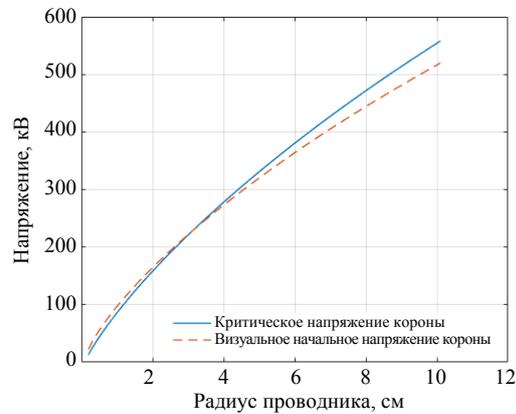


Рис. 2. Потери активной мощности на корону при различных расстояниях между проводниками
Fig. 2. Active power losses due to corona at different distances between conductors

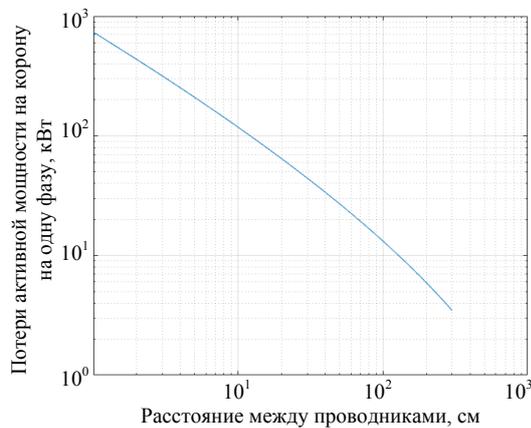
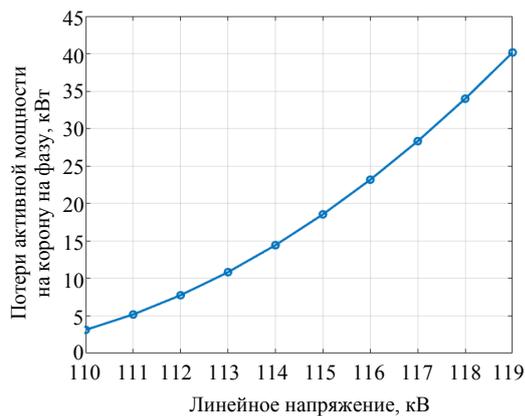


Рис. 3. Зависимость потерь активной мощности на корону от линейного напряжения
Fig. 3. Dependence of active power losses to corona on line voltage



Выражение (3) показывает, что потери активной мощности на коронный разряд прямо пропорциональны квадратному корню из размера проводника. Графическая зависимость, приведенная на рис. 4, показывает, что увеличение диаметра проводника приводит к соответствующему повышению потерь активной мощности на корону.

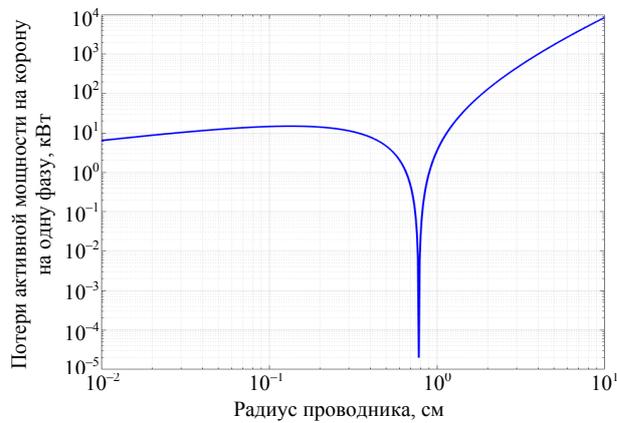


Рис. 4. Потери активной мощности в зависимости от радиуса проводника

Fig. 4. Active power losses depending on the radius of the conductor

В штормовых или плохих атмосферных погодных условиях, таких как снег, дожди и изморозь, снижается критическое напряжение и усиливается эффект короны. На рис. 5 показан график потерь активной мощности на корону как в плохую, так и в ясную погоду при различных значениях критических напряжений пробоя. Результаты свидетельствуют о том, что чем ниже значение критического напряжения пробоя, тем выше потери мощности вследствие коронного разряда.

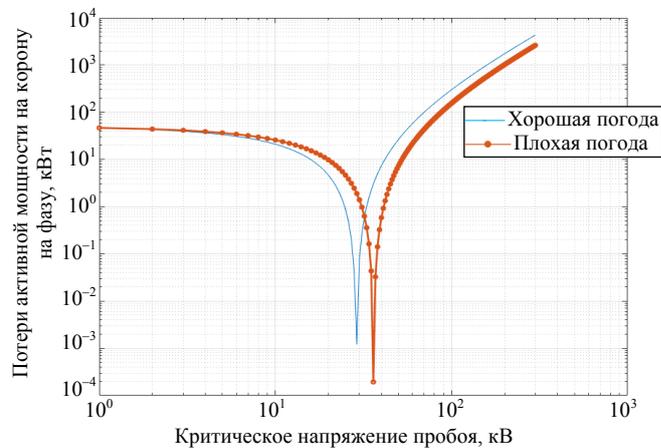


Рис. 5. Потери активной мощности в зависимости от критического напряжения

Fig. 5. Active power losses depending on the critical voltage

В настоящее время в Европейском союзе активно используется программный комплекс FACE (Field and Corona Effects), который применяется для определения общих эффектов коронного разряда и поля высоковольтных линий электропередачи переменного, постоянного или переменного/постоянного тока (рис. 6).

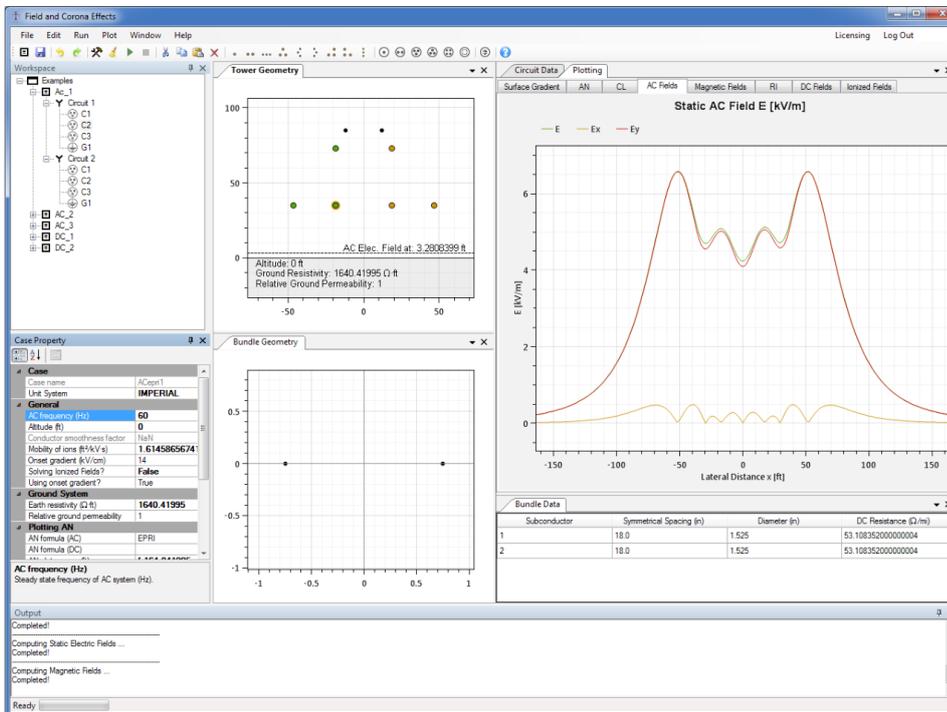


Рис. 6. Интерфейс программного комплекса FACE (Field and Corona Effects)

Fig. 6. Interface of the FACE (Field and Corona Effects) software package

Программный комплекс способен определить потери активной мощности на коронирование, уровни слышимых шумов, радиопомех, количественные характеристики магнитных, статических и ионизированных электрических полей. В качестве математического аппарата программного обеспечения используются формулы Пика (1)–(3) и Петерсона (5), однако по заявлениям разработчиков [9] при расчетах программный комплекс учитывает только два типа погоды: плохая и хорошая. При этом для моделирования плохих погодных условий разработчики завышают показатель критического напряжения $E_{кп}$ в 0,8 раза выше значения в хорошую погоду, не учитывая разнообразия типов погодных условий, присутствующих в реальных условиях эксплуатации линий электропередачи.

В связи с этим авторами статьи был реализован подход, учитывающий все разнообразие климатических условий Республики Беларусь, и проведен расчет удельных потерь активной мощности на корону для воздушных линий электропередачи напряжением 110–750 кВ по методике [11]. Это позволило в рамках выполнения ХД 3543-22 использовать предоставленные ГПО «Белэнерго» типы используемых опор (списочно), марки проводов, шаг расщепления проводов ВЛ и другую необходимую информацию.

В соответствии с выбранной методикой составлена математическая модель и проведена серия расчетов удельных потерь активной мощности на

корону. Алгоритм автоматизирован в программном комплексе Mathcad. Результаты расчетов для всех исходных данных приведены в виде файлов таблиц Microsoft Excel, пример работы с которыми приведен на рис. 7. Расчетные файлы содержат данные и значения удельных потерь активной мощности на корону для четырех типов погоды на различных проводах ВЛ 110–750 кВ.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	ТИП ОПОРЫ	МАРКА	СТРЕЛА	Дельта	Хорош	Сухой	Дождь	Изморозь	
4			1	0,442	1,985	7,281	26,193		
4			1	0,459	2,076	7,583	27,149		
4			1	0,487	2,235	8,098	28,752		
4			1	0,508	2,353	8,48	29,939		
4			1	0,525	2,453	8,792	30,877		
4			1	0,53	2,482	8,884	31,156		
4			1	0,533	2,498	8,935	31,313		
4			1	0,536	2,518	8,995	31,487		
4			1	0,537	2,52	8,988	31,388		
4			1	0,544	2,561	9,126	31,864		
4			1	0,834	4,139	13,779	44,069		
4			1	0,864	4,336	14,429	46,168		
4			1	0,903	4,544	15,028	47,67		
4			1	0,942	4,752	15,625	49,093		
4			1	0,963	4,849	15,881	49,571		
4			1	0,98	4,945	16,162	50,373		
4			1	0,982	4,948	16,153	50,159		
4			1	0,992	5,001	16,309	50,554		
4			1	1,009	5,092	16,57	51,213		
4			1	1,012	5,112	16,636	51,444		
4			1	1,017	5,117	16,572	51,061		
4			1	1,025	5,185	16,855	52,02		
4			1	1,028	5,194	16,866	51,97		

Рис. 7. Пример работы с результатами расчета для ВЛ 330 кВ

Fig. 7. An example of the work using calculation results for 330 kV overhead power lines

Последовательно выбрав тип опоры, марку провода (для линий 330 и 220 кВ), стрелу провеса (0–20 м, если позволяют допустимые расстояния до земли) и плотность воздуха (0,95–1,2 с шагом 0,005), можно получить расчетные величины удельных потерь активной мощности на корону для четырех видов погодных условий [12].

Анализ результатов расчета указывает на то, что удельные потери активной мощности на корону зависят от множества факторов. Среди них можно выделить группу следующих наиболее важных факторов: геометрические параметры (тип опоры), марку провода, стрелу провеса провода, шаг расщепления, температуру окружающей среды и атмосферное давление.

Так, с целью оценки влияния потерь на корону ВЛ 110 кВ проведены расчеты для типовых опор П110-1, ПБ110-1, ПБ110-3, ПБ110-5 соответственно для проводов марок АС-70, АС-95, АС-120, АС-150, АС-240.

В действующей в настоящее время в Республике Беларусь инструкции [1] на предприятиях, в учреждениях и организациях ГПО «Белэнерго» величина относительной плотности воздуха в расчете потерь активной мощности на корону не учитывается [1]. В рамках выполнения настоящей

работы были проведены исследования влияния указанной величины на удельные потери активной мощности на корону для конкретных типов опор ВЛ. В табл. 3 приведены результаты расчетов потерь на корону по маркам провода для всего диапазона изменения стрел провеса и относительной плотности воздуха.

Таблица 3

Результаты расчетов потерь на корону по маркам провода
Calculation results of active power losses due to corona by wire brand

Марка провода	Диапазон изменения удельных потерь мощности на корону, кВт/км, при погоде			
	хорошей	сухом снеге	дожде	изморози
АС-70	0,022–0,080	0,088–0,393	0,311–1,345	1,250–4,487
АС-95	0,022–0,057	0,094–0,243	0,270–0,915	1,160–3,388
АС-120	0,027–0,047	0,117–0,183	0,329–0,675	1,422–2,652
АС-150	0,038	0,157	0,474–0,476	2,010–2,015
АС-240	–	–	–	–

В табл. 4 приведены диапазоны изменения удельных потерь мощности на корону лишь для тех случаев, когда они значительны. Так, для провода марки АС-240 величину удельных потерь мощности на корону вследствие большого радиуса проводника можно не учитывать.

Таблица 4

Сочетания типов опор с марками проводов, при которых возникают потери активной мощности на корону
Combination of pole types and wire brands at which active losses due to corona occur

Тип опоры	Марки проводов
П110-1	АС-70, АС-95, АС-120
ПБ110-1	АС-70, АС-95, АС-120, АС-150
ПБ110-3	АС-70, АС-95, АС-120, АС-150
ПБ110-5	АС-70, АС-95, АС-120

При строительстве ВЛ, как правило, применяются типовые опоры, характеристики которых приведены в соответствующих альбомах. Некоторые типы опор с указанием применяемых проводов приведены в табл. 4. Сочетание указанных опор ВЛ и проводов приводит к возникновению потерь активной мощности на корону.

Помимо геометрических параметров ВЛ, определяющими факторами, влияющими на потери активной мощности на корону, являются продолжительность и вид погодных условий. Использование архивных погодных данных, их прогнозирование [12, 13] возможно также для анализа климатической составляющей потерь активной мощности [14–16].

Основными видами погоды, используемыми в настоящее время при расчете потерь активной мощности на корону, являются:

«1) хорошая погода – это погода с относительной влажностью воздуха менее 90 %, без осадков, тумана и отложений росы, инея, изморози и гололеда на проводах;

2) сухой снег, к которому относятся также снежная крупа, снежные зерна, ледяные иглы в воздухе, метели с выпадением снега (за исключением низовой метели и поземок, которые не достигают проводов);

3) дождь – дожди разной интенсивности, в том числе морось и мокрый снег, так как их влияние на уровень потерь на коронирование близко к влиянию дождя;

4) изморозь, приводящая к гололедно-изморозевым отложениям на проводах. Сюда также относятся кристаллическая и зернистая изморозь, гололед, сложные отложения на проводах» [17].

В реальных климатических условиях, согласно данным Гидрометеоцентра, погодные условия не ограничиваются указанными четырьмя видами. Проведенный анализ архивных погодных данных позволил выделить гораздо большее количество видов и сочетаний погодных условий, которые в совокупности с возможностью их прогнозирования [18] позволяют выделить гораздо большее количество видов погоды и их сочетаний.

В соответствии с п. 74 Инструкции по расчету и обоснованию нормативов расхода электроэнергии на ее передачу по электрическим сетям [1], продолжительность каждой группы погодных условий в зоне ВЛ за расчетный период необходимо принимать на основании данных Гидрометеоцентра. Эти данные вносятся в программный комплекс по расчету потерь. Окно ввода числа часов погодных данных приведено на рис. 8.

Число часов в текущем расчётном периоде, ч				
<input type="text"/>	соответствующее 2-й группе погоды (хорошая погода с влажностью 90% и более, дождь, мокрый снег, роса)			
<input type="text"/>	соответствующее 3-й группе погоды (туман)			
<input type="text"/>	хорошей погоде	<input type="text"/>	сухому снегу	<input type="text"/>
			дождю	<input type="text"/>
				изморози

Рис. 8. Пример окна ввода числа часов погодных данных

Fig. 8. An example of the input window for the number of hours of weather data

Сбор данных осуществлялся по 3-часовым интервалам о типе погодных данных за период 2005–2022 гг. по следующим метеостанциям, приведенным на рис. 9: Верхнедвинск, Утена (Литва), Шарковщина, Лынтупы, Полоцк, Докшицы, Лепель, Витебск (аэропорт), Сенно, Вильнюс (Литва), Орша, Борисов, Горки, Смоленск (Россия), Лида, Уручье (Минск), Марьяна Горка, Кличев, Славгород, Костюковичи, Барановичи, Слуцк, Бобруйск, Жлобин, Пинск, Житковичи, Мозырь, Василевичи, Гомель, Брагин, Чернигов (Украина), Березино.

В процессе анализа погодных данных выявлено более 1400 видов погоды (в том числе сочетаний), которые приводились к одному из восьми типов. Для каждого из восьми типов рассчитывали вероятность возникновения видов погоды по месяцам, после чего брали среднегодовое значение суммарной вероятности, которая затем использовалась для определения типа погоды. Данные о плотности воздуха рассчитывались на основе статистических данных конкретной метеорологической станции об атмосферном давлении и температуре воздуха.

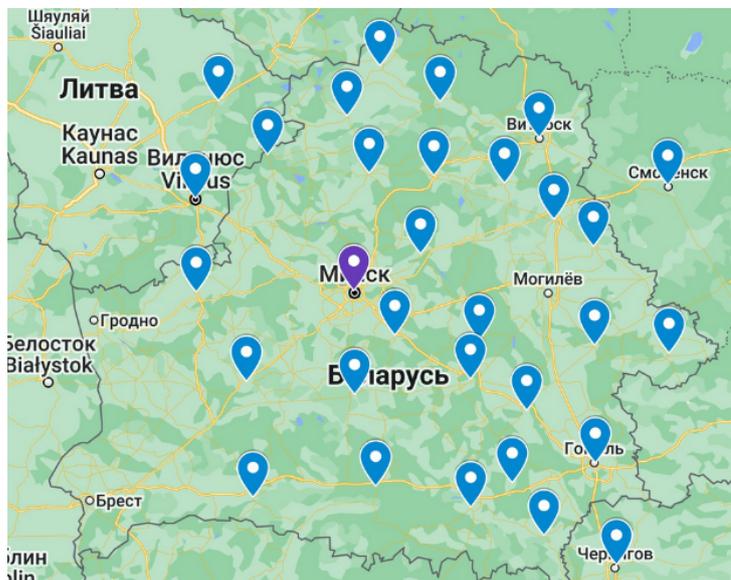


Рис. 9. Карта автоматизированных метеорологических станций

Fig. 9. The map automated weather stations

Для расчета вероятности возникновения погоды можно определить вероятность возникновения погоды за каждый месяц или учитывая ее как среднегодовую. Пример результатов расчета вероятности возникновения конкретных погодных условий приведен в табл. 5 (для станции Березино).

Чтобы определить значение потерь активной мощности на корону, необходимо сложить соответствующие группы вероятностей Ψ для метеостанции и умножить их на расчетные значения удельных потерь при соответствующем значении плотности воздуха.

Приведем расчет для среднегодового значения $\delta = 1,040$ для провода марки 2хАС-300. Вероятность возникновения погодных условий в среднем за год приведена в последней строке табл. 5.

Тогда при работе ВЛ в течение года удельные потери активной мощности на корону составят 42845,22 кВт/км. Полученная величина отличается от значения, рассчитанного по действующей инструкции, на 29,4 % для линии номинальным напряжением 330 кВ.

При расчете суммарных потерь электроэнергии на корону необходимо правильно учитывать:

- продолжительность группы погоды по времени;
- потери мощности на корону для соответствующей группы погоды.

Для проведения сравнительного анализа результатов расчета потерь мощности на корону дополнительно апробированы следующие методики с учетом [13]:

- усредненных по конструкции фаз потерь мощности на корону по действующей инструкции [1];
- точных потерь мощности на корону по методике, рассчитывая удельные потери активной мощности на каждой опоре ВЛ [12].

Таблица 5

Значения вероятности Ψ возникновения погодных условий
Probability Ψ of occurrence of weather conditions

Месяц	Среднее значение вероятности возникновения погодных условий										Среднее значение плотности воздуха
	Хорошая погода	Дождь	Мокрый снег	Сухой снег	Зернистая изморозь	Кристаллическая изморозь	Туман	Повышенная влажность воздуха в хорошую погоду			
Январь	0,344691598	0,136832339	0,035172966	0,15295	0,012593	0,005008	0,060045104	0,252705886	1,088718818		
Февраль	0,424304544	0,117869132	0,030533217	0,14998	0,004235	0,001588	0,072004574	0,199482303	1,088268931		
Март	0,584519398	0,120198909	0,028350085	0,06901	0,001188	0	0,041012683	0,155723012	1,062735533		
Апрель	0,715611036	0,144860933	0,01131662	0,00273	0	0	0,020841853	0,104643701	1,03587887		
Май	0,620071354	0,205612641	0,005524507	0,00024	0	0	0,025043769	0,143510537	1,016993749		
Июнь	0,653588762	0,159336169	0,008419891	0,00025	0	0	0,020313425	0,158096655	1,000974138		
Июль	0,575325657	0,176055221	0,011207678	0	0	0	0,040667132	0,196744313	0,995019516		
Август	0,591224898	0,156336562	0,005074243	0	0	0	0,054222058	0,19314224	1,000887995		
Сентябрь	0,525798841	0,153986632	0,001309058	0,00074	0	0	0,072807436	0,245361713	1,021486429		
Октябрь	0,45261223	0,159820631	0,002143462	0,00629	0	0	0,083913713	0,295222458	1,045522041		
Ноябрь	0,319293404	0,178725709	0,010840889	0,04155	0,005225	0	0,167726352	0,276641873	1,060724064		
Декабрь	0,282170946	0,167817654	0,026078282	0,1209	0,014071	0,000975	0,095670699	0,292317316	1,074957152		
Среднее за год	0,508236078	0,156551038	0,014563213	0,04486	0,003063	0,000609	0,062869579	0,209252996	1,04097599		

В свою очередь, их можно учитывать в соответствии со следующими подходами (учет геометрии ВЛ):

- учет потерь мощности для каждого эквивалентного участка;
- учет потерь мощности для преобладающего по суммарной длине участка ВЛ, принятого на всей длине ВЛ.

При определении потерь мощности на корону значимым фактором также является выбор методики учета относительной плотности воздуха, которую для расчета можно определить по следующим параметрам:

- учет фактической относительной плотности воздуха для каждого конкретного месяца года;
- учет среднестатистической относительной плотности воздуха за все время по результатам анализа статистических данных периода метеонаблюдений.

При учете продолжительности погоды по времени можно также пользоваться такими различными методиками, как:

- учет продолжительности погоды по времени по действующей методике;
- учет продолжительности погоды по времени по фактическим часам для соответствующих групп для каждого конкретного месяца года;
- учет среднестатистических продолжительностей погоды по времени за все время по результатам анализа статистических данных всего периода метеонаблюдений.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена задача определения удельных потерь активной мощности на корону в воздушных линиях электропередачи основных электрических сетей Республики Беларусь и влияние их конструктивных особенностей и параметров. Доказано, что для более точного расчета удельных потерь мощности на корону необходимо учитывать следующие факторы: тип опоры, марку провода, стрелу провеса провода, междуфазное расстояние между проводами ВЛ, виды погоды и плотность воздуха. Это позволит уйти от средних удельных значений (в соответствии с методикой из действующей инструкции) потерь активной мощности на корону и перейти к более точным значениям.

2. Проанализированы все виды погодных условий, характерных для территории страны. Полученные данные преобразованы и приведены к форме, пригодной для использования в качестве вероятностных показателей при расчетах удельных потерь активной мощности на корону. Учет часов погоды предлагается вести по данным автоматизированных метеорологических станций и по данным датчиков погоды, предоставляемых ежемесячно. Анализ погоды по данным метеорологических станций не всегда показывает повторяемость погодных условий по годам, что

не позволяет корректно использовать усредненные показатели за все время наблюдений.

3. Развита методы и алгоритмы расчета потерь активной мощности на коронирование для прогнозирования и нормирования потерь электроэнергии по схемно-техническим и расчетным данным.

4. Анализ результатов расчета удельных потерь активной мощности на корону показывает, что их учет на ВЛ 110 кВ также необходимо производить по уточненным параметрам. Для некоторых параметров ВЛ (например, для марки провода АС-240) их можно не учитывать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении Положения по нормированию расхода топливно-энергетических ресурсов на предприятиях, в учреждениях и организациях государственного производственного объединения «Белэнерго», Инструкции по расчету и обоснованию нормативов расхода электроэнергии на ее передачу по электрическим сетям [Электронный ресурс]: постановление Министерства энергетики Республики Беларусь от 16.12.2013 № 48 (в ред. пост. от 05.07.2017 № 23). Режим доступа: <https://energodoc.by/document/view?id=3068>.
2. Peek, F. W. Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering / F. W. Peek. New York, NY, USA: McGraw-Hill Book Company, 1920.
3. HVDC Corona Current Characteristics and Audible Noise During Wet Weather Transitions / S. Hedtke [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 35, No 2. P. 1038–1047. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2019.2936285>.
4. Anguan, W. Line loss prediction and loss reduction plan for power grids / W. Anguan, N. Baoshan. John Wiley & Sons, Ltd, 2016. 361 p. <https://doi.org/10.1002/9781118867273.ch13>.
5. Кононов, Ю. Г. Методы определения потерь мощности и энергии на корону в действующих ВЛ / Ю. Г. Кононов, В. А. Костюшко О. С. Рыбасова // Энергия единой сети. 2017. № 6 (35). С. 22–40.
6. Костюшко, В. А. Расчет потерь мощности на корону на воздушных линиях электропередачи переменного тока / В. А. Костюшко // Энергия единой сети. 2016. № 3 (26). С. 40–47.
7. Maruvada, P. S. Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines / P. S. Maruvada. Baldock, UK: Research Studies Press, 2000. 310 p.
8. Kononov, Y. The Reactive Corona Effect Investigation Based on PMU Measurements in a Real 500 kV TL / Y. Kononov, A. Diachenko // 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Prague, Czech Republic, 2022. P. 1–3, doi: 10.1109/ICECET55527.2022.9872716.
9. Matthews, J. C. The effect of weather on corona ion emission from AC high voltage power lines / J. C. Matthews // Atmospheric Research. 2012. Vol. 113. P. 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.03.016>.
10. Li, Q. Calculating the Surface Potential Gradient of Overhead Line Conductors / Q. Li, S. M. Rowland, R. Shuttleworth // IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. Vol. 30, No 1. P. 43–52. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2014.2325597>.
11. Fied and Corona Effect [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.pscad.com/software/face/overview>. Date of access: 19.11.2023.
12. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330–750 кВ и постоянного тока 800–1150 кВ. М.: СЦНТИ, 1975.
13. Sekatski, D. A. Comparative Analysis of Active Power Losses Per Corona of 330 kV Overhead Lines / D. A. Sekatski, A. I. Khalyasmaa, N. A. Papkova // 2023 Belarusian-Ural-Siberian Smart Energy Conference (BUSSEC). Ekaterinburg, 2023. P. 24–27. <https://doi.org/10.1109/bussec59406.2023.10296425>.

14. Оперативное прогнозирование скорости ветра для автономной энергетической установки тяговой железнодорожной подстанции / П. В. Матренин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. 66, № 1. С. 18–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-18-29>.
 15. Расписание погоды [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tr5.by/> Дата доступа: 19.11.2023.
 16. Секацкий, Д. А. Учет атмосферной составляющей в задаче расчета потерь мощности и электроэнергии в линиях электропередачи на примере годовых погодных данных Минска / Д. А. Секацкий // Энергия и Менеджмент. 2016. № 5. С. 25–29.
 17. Баламетов, А. Б. Моделирование режимов электрических сетей на основе уравнений установившегося режима и теплового баланса / А. Б. Баламетов, Э. Д. Халилов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 66–80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80>.
 18. Костюшко, В. А. Анализ расчетных и экспериментальных оценок потерь мощности на корону на воздушных линиях электропередач переменного тока / В. А. Костюшко. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2011. 84 с.
 19. Повышение точности прогнозирования генерации фотоэлектрических станций на основе алгоритмов k -средних и k -ближайших соседей / П. В. Матренин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 4. С. 305–321. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321>.
- Поступила 16.08.2023 Подписана в печать 20.10.2023 Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. *On Approval of the Regulations on Rationing the Consumption of Fuel and Energy Resources at Enterprises, Institutions and Organizations of the "Belenergo" State Production Association, Instructions on Calculation and Justification of Norms for Electricity Consumption for its Transmission through Electrical Networks*. Resolution of the Ministry of Energy of the Republic of Belarus of December 16, 2013 No. 48 (As Amended by Resolution of July 5, 2017 No 23). Available at: <https://energodoc.by/document/view?id=3068> (in Russian).
2. Peek F. W. (1920) *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*. New York, McGraw-Hill Book Company.
3. Hedtke S., Xu P., Pfeiffer M. D., Zhang B., He J., Franck Ch. (2020) HVDC Corona Current Characteristics and Audible Noise During Wet Weather Transitions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35 (2), 1038–1047. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2019.2936285>.
4. Anguan W., Baoshan N. (2016) *Line Loss Prediction and Loss Reduction Plan for Power Grids*. John Wiley & Sons, Ltd. 361 p. <https://doi.org/10.1002/9781118867273.ch13>.
5. Kononov U. G., Kostyushko V. A., Rybasova O. S. (2017) Estimation of the Power Loss due to Corona in the Active Highlights. *Energiya edinoi seti = Energy of Unified Grid*, (6), 22–40 (in Russian).
6. Kostyushko V. A. (2016) Alternate Current Overhead Grid Corona Power Losses Calculations, *Energiya Edinoi Seti = Energy of Unified Grid*, (3), 40–47 (in Russian).
7. Maruvad, P. S. (2000) *Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines*. Baldock, UK: Research Studies Press.
8. Kononov Y., Diachenko A. (2022) The Reactive Corona Effect Investigation Based on PMU Measurements in a Real 500 kV TL. *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*. Prague, Czech Republic, 1–3. doi: 10.1109/ICECET55527.2022.9872716.
9. Matthews J. C. (2012) The Effect of Weather on Corona Ion Emission from AC High Voltage Power Lines. *Atmospheric Research*, 113, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.03.016>.

10. Li Q., Rowland S. M., Shuttleworth R. (2015) Calculating the Surface Potential Gradient of Overhead Line Conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30 (1), 43–52. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2014.2325597>.
11. *Filed and Corona Effect*. Available at: <https://www.pscad.com/software/face/overview> (accessed 19 November 2023).
12. *Guidelines for Accounting for Corona Losses and Corona Interference in the Selection of AC 330–750 kV and DC 800–1150 kV Overhead Power Line Wires*. Moscow, 1975 (in Russian).
13. Sekatski D. A., Khalyasmaa A. I., Papkova N. A. (2023) Comparative Analysis of Active Power Losses Per Corona of 330 kV Overhead Lines. *2023 Belarusian-Ural-Siberian Smart Energy Conference (BUSSEC)*. Ekaterinburg, 24–27. <https://doi.org/10.1109/bussec59406.2023.10296425>.
14. Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Rusina A. G., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A. (2023) Operational Forecasting of Wind Speed for a Self-Contained Power Assembly of a Traction Substation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (1), 18–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-18-29> (in Russian).
15. *Reliable Prognosis*. Available at: <https://rp5.by> (accessed 19 November 2023) (in Russian).
16. Sekatski D. A. (2016) Consideration of the Atmospheric Component in the Problem of Calculating Power and Electricity Losses in Power Transmission Lines Using the Example of Annual Weather Data in Minsk. *Energiya i Menedzhment [Energy and Management]*, (5), 25–29 (in Russian).
17. Balametov A. B., Halilov E. D. (2020) Simulation of Electric Networks Modes Using Steady-State and Heat Balance Equations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 66–80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80> (in Russian).
18. Kostyushko V. A. (2011) *Analysis of Calculated and Experimental Estimates of Power Losses on Overhead AC Power Lines due to Corona*. Moscow, Energoprogress Publ. 84 (in Russian).
19. Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Gamaley V. V., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A., Potachits Y. V. (2023) Improving of the Generation Accuracy Forecasting of Photovoltaic Plants Based on k -Means and k -Nearest Neighbors Algorithms. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*; 66 (4), 305–321. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-33-49>

УДК 681.51 (075.8)

Структурно-параметрическая оптимизация регуляторов впрысков паровых котлов

Г. Т. Кулаков¹⁾, Н. В. Воюш¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Регулирование температуры пара существенно влияет на экономичность, надежность и долговечность работы паровых котлов. В статье особое внимание уделено обоснованию актуальности существенного повышения эффективности работы регуляторов впрыска паровых котлов, работающих в широком диапазоне изменения нагрузок. Отмечено, что одним из основных направлений решения указанной проблемы является использование оптимальных регуляторов с динамической компенсацией и комбинированных принципов регулирования по отклонению и возмущению одновременно. Предложена комбинированная система автоматического регулирования с полной инвариантностью по отношению к наиболее опасному измеряемому внутреннему возмущению и с частичной инвариантностью при отработке внешнего возмущения с заданными допустимыми отклонениями регулируемого параметра. При этом для повышения качества регулирования при основных воздействиях оптимизацию целесообразно осуществлять с использованием передаточных функций опережающего и главного участков объекта регулирования; внутренний контур двухконтурной системы превращать при отработке корректирующего воздействия в усилитель с единичным коэффициентом передачи. Структуру корректирующего регулятора необходимо формировать на основе принципа динамической компенсации для объектов с условным запаздыванием по каналу регулирующего воздействия, позволяющего при отработке задающего скачка обеспечить заданное качество регулирования. Таким образом достигается существенное повышение быстродействия и точности при отработке внутренних и внешних измеряемых возмущений по сравнению с типовой двухконтурной системой или инвариантной системой автоматического регулирования с внутренней моделью, что позволяет рекомендовать предлагаемую инвариантную каскадную систему автоматического регулирования для широкого внедрения в области автоматизации теплоэнергетических процессов.

Ключевые слова: динамическая компенсация, двухканальность, существенное повышение качества регулирования, инвариантная каскадная система автоматического регулирования

Для цитирования: Кулаков, Г. Т. Структурно-параметрическая оптимизация регуляторов впрысков паровых котлов / Г. Т. Кулаков, Н. В. Воюш // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 1. С. 33–49. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-33-49>

Адрес для переписки

Кулаков Геннадий Тихонович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

Address for correspondence

Kulakov Gennady T.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

Structural and Parametric Optimization of Steam Boiler Injection Regulators

G. T. Kulakov¹⁾, N. V. Voyush¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Steam temperature control significantly affects the efficiency, reliability and durability of steam boilers. In the article, special attention is paid to substantiating the relevance of a significant increase in the efficiency of steam boiler injection regulators operating in a wide range of load changes. It is indicated that one of the main directions of solving this problem is the use of optimal regulators with dynamic compensation and combined principles of regulation for deviation and perturbation at the same time. A combined automatic control system is proposed with full invariance with respect to the most dangerous measured internal disturbance and with partial invariance when working out an external disturbance with specified permissible deviations of the controlled parameter. At the same time, in order to improve the quality of regulation under the main influences, it is proposed to carry out optimization with the use of the transfer functions of the leading and main sections of the control object as well as to turn the internal contour of the two-circuit system into an amplifier with a single transmission coefficient when working out the corrective action. Also, it is proposed to form the structure of the corrective regulator on the basis of the principle of dynamic compensation for objects with a conditional delay along the channel of regulatory action, which makes it possible to ensure the specified quality of regulation when working out the control action surge. Thus, a significant increase in speed and accuracy is achieved when working out internal and external measured disturbances compared to a typical two-circuit system or an invariant automatic control system with an internal model, which makes it possible to recommend the proposed invariant cascade automatic control system for widespread implementation in the field of automation of thermal power processes.

Keywords: dynamic compensation, dual channel, significant improvement in the quality of regulation, invariant cascade automatic control system

For citation: Kulakov G. T., Voyush N. V. (2024) Structural and Parametric Optimization of Steam Boiler Injection Regulators. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (1), 33–49. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-33-49> (in Russian)

Введение

Создание систем автоматического регулирования (САР) высокой динамической точности паровых котлов, работающих в широком диапазоне изменения нагрузки, является актуальной технической задачей. Температура перегретого пара на выходе котла относится к основным параметрам, определяющим экономичность и надежность работы теплоэнергетического оборудования [1, 2].

Центральная задача теории автоматического управления – синтез систем, в результате которого определяют состав, структуру системы автоматического управления (САУ) и параметров всех ее регулирующих устройств из условия удовлетворения заданным техническим требованиям: обеспечение устойчивости и качества переходных процессов за счет увеличения быстродействия и повышения точности управления.

Одним из основных направлений решения указанной задачи является использование принципа динамической компенсации, позволяющего определять пути обеспечения заданного качества работы САУ и на этой основе

найти математическую модель и структурную схему оптимального регулятора, места его включения, а также его динамические параметры. При этом задача синтеза оптимальных регуляторов с динамической компенсацией решается в два этапа:

– определение эталонной передаточной функции САУ при обработке задания по исходной передаточной функции объекта по каналу регулирующего воздействия;

– структурно-параметрический синтез оптимального регулятора, обеспечивающего приближение заданной и реальной переходных характеристик замкнутой системы при обработке лишь задания [3].

Передаточная функция оптимального регулятора для обработки задания содержит две части: компенсирующую динамику объекта и эталонную передаточную функцию разомкнутой системы. В [3] отмечается, что реализация обратной передаточной функции объекта физически трудна, особенно для объектов с запаздыванием. Применение принципа динамической компенсации интересно, поскольку формально приводит к решению задачи приближения реальной переходной характеристики замкнутой системы к заданной, хотя и является чрезвычайно сложной задачей, решение которой возможно лишь в исключительно простых случаях [3].

Из всего многообразия различных методов регулирования температуры перегретого пара барабанных паровых котлов в СНГ наиболее широко применяют метод регулирования впрыском собственного конденсата [2], а для прямоточных котлов – впрыском питательной воды.

В зарубежной практике нашли применение двухконтурные системы автоматического регулирования температуры перегретого пара с корректирующим и стабилизирующим регуляторами, которые в некоторых случаях имеют значительные преимущества перед типовыми системами автоматического регулирования (САР) с дифференциаторами промежуточного сигнала (САР с дифференциатором), используемыми в СНГ. Методы расчета параметров динамических настроек типовых двухконтурных замкнутых САР приведены в [4–12]. Вместе с тем в типовых САР практически невозможно достичь полной ликвидации отклонений даже температуры пара за местом впрыска от ее заданного значения, так как попытка увеличить коэффициент передачи системы с целью повышения точности системы приводит к ухудшению или даже потере системой устойчивости [12]. В работах [4–8] предложено использовать комбинированные САР с разомкнутыми контурами и устройствами компенсации (УК) дополнительно измеряемых возмущений, в которых не имеется условий для появления неустойчивой работы, как в замкнутых контурах. В этих случаях выбор параметров УК совершенно не лимитируется соображениями устойчивости, так как введение добавочного информационного канала не приводит к появлению нового замкнутого контура передачи воздействия и не влияет на устойчивость [5]. Также комбинированные системы позволяют принципиально получать системы регулирования, частично инвариантные относительно тех возмущений, дополнительное воздействие от которых вводится

в систему. Вместе с тем известно, что выполнение условий абсолютной инвариантности регулируемых величин от указанных возмущений возможно далеко не всегда либо их реализация технически очень сложна [3].

В [9–11] приведены аналитические методы структурно-параметрической оптимизации САР теплоэнергетических процессов на основе принципов динамической компенсации и инвариантности к возмущающим воздействиям, позволяющие повысить качество регулирования при основных воздействиях, а также устранить ряд указанных выше недостатков. Так, инвариантная каскадная система автоматического регулирования (ИКСАР) с внутренней моделью, предложенная в работе [11], позволяет уменьшить при отработке наиболее опасного крайнего внешнего возмущения модуля площади ошибки регулирования в 1,8 раза по сравнению с типовой каскадной системой автоматического регулирования. В [13–16] методы структурно-параметрической оптимизации САР использовались для выбора и обоснования рациональной структуры систем автоматического управления мощностью энергоблоков.

Таким образом, устранение ряда известных недостатков синтеза оптимальных САР с использованием принципов динамической компенсации и инвариантности относительно внутренних и внешних возмущений с целью дальнейшего существенного повышения быстродействия и точности регулирования представляется актуальной задачей.

Общие принципы динамической компенсации в задачах структурно-параметрического синтеза оптимальных регуляторов теплоэнергетических процессов

Первый этап синтеза оптимального регулятора с динамической компенсацией включает задачу выбора и обоснования заданной передаточной функции замкнутой системы при отработке задания. В [3] отмечено, что построение заданной передаточной функции критерия оптимальной отработки задания в классе оптимизированных задач с минимизацией интеграла от суммы квадратов ошибки и регулируемого воздействия не удовлетворяет условию физической реализуемости, а решение этой задачи в классе низкочастотных фильтров Баттерворта с использованием амплитудно-частотных характеристик идеального фильтра приводит к появлению перерегулирования при отработке скачка задания, величина которого увеличивается с ростом порядка ряда Тейлора для функции ошибки. В этой же работе указано, что можно получить переходный процесс без перерегулирования для случая вещественных корней знаменателя заданной передаточной функции критерия оптимальной отработки системой скачка задания. Вместе с тем известно, что минимального времени регулирования можно добиться при одинаковых значениях постоянных времени ряда последовательно соединенных апериодических звеньев. При этом общее время отработки скачка задания будет тем меньше, чем меньше величина запаздывания по каналу управляющего воздействия, а также количество

последовательно соединенных звеньев и численное заданное значение постоянных времени передаточной функции критерия оптимальной отработки задания [9–11]. В этом случае структура заданной передаточной функции системы при отработке задания должна полностью соответствовать структуре передаточной функции объекта по каналу управляющего воздействия [10].

Динамические характеристики по температуре перегретого пара за местом впрыска можно получить расчетным или экспериментальным путем в виде соответствующих переходных характеристик, аппроксимируемых передаточными функциями апериодических звеньев второго порядка, которые часто заменяют реальным пропорциональным звеном [2]

$$W_{\text{оп}}(s) = \frac{K_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}s + 1}, \quad (1)$$

где $K_{\text{оп}}$ – коэффициент усиления опережающего участка, °C/Т/ч; $T_{\text{оп}}$ – большая постоянная времени, равная сумме постоянных времени знаменателя апериодического звена второго порядка с различными постоянными времени, с; s – оператор Лапласа.

При этом экспериментные переходные характеристики главного участка пароперегревателя представляют собой монотонные кривые, которые целесообразно представить в виде инерционного звена второго порядка с условным запаздыванием [10]:

$$W_{\text{гл}}(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_{\text{гл}} e^{-\tau_y s}}{(T_{\text{гл}}s + 1)(\sigma_{\text{гл}}s + 1)}, \quad (2)$$

где $K_{\text{гл}}$ – коэффициент усиления главного участка, °C/°C; $T_{\text{гл}}$, $\sigma_{\text{гл}}$ – соответственно большая и меньшая постоянные времени, с; τ_y – условное запаздывание по каналу управляющего воздействия, с; $Y(s)$ – изображение выходной переменной (температура пара за котлом); $X(s)$ – то же входной переменной (расход воды на впрыск).

В этом случае расчетная переходная характеристика объекта, полученная из передаточной функции (2), точнее совпадает с экспериментальной кривой разгона.

Для двухконтурной каскадной системы автоматического регулирования (КСАР) температуры перегретого пара парового котла необходимо выбрать две заданные передаточные функции оптимальной отработки скачка задания по промежуточной регулируемой величине и основной регулируемой величине с использованием следующего алгоритма: в числителе заданной передаточной функции замкнутого контура для участков без запаздывания появляется единица, для участков с запаздыванием – передаточная функция условного запаздывания, а в знаменателе критерия оптимальной отработки скачка задания – столько апериодических звеньев с одинаковой заданной постоянной времени, каков порядок знаменателя

передаточной функции участка. Для опережающего участка пароперегревателя со стабилизирующим регулятором КСАР заданная передаточная функция оптимальной отработки задания промежуточной регулируемой величины с учетом (1) примет вид реального пропорционального звена

$$W_{зд1}(s) = \frac{1}{T_{зд1}s + 1}. \quad (3)$$

Здесь $T_{зд1}$ – расчетный параметр динамической настройки стабилизирующего регулятора; $T_{зд1} = \gamma_1 T_{оп}$; γ_1 – весовой коэффициент из ряда чисел пропорции золотого сечения, где за целое принято численное значение $T_{оп}$ [10]:

$$\gamma_1 \in [0,09; 0,146; 0,236; 0,382; 0,618]. \quad (4)$$

Для главного участка пароперегревателя внешнего контура КСАР с корректирующим регулятором заданная передаточная функция оптимальной отработки скачка задания основной регулируемой величины с учетом передаточной функции главного участка (2) примет следующий вид:

$$W_{зд2}(s) = \frac{e^{-\tau_y s}}{(T_{зд2}s + 1)^2}. \quad (5)$$

Здесь $T_{зд2}$ – расчетный параметр оптимальной динамической настройки корректирующего регулятора, равный

$$T_{зд2} = \gamma \tau_y, \quad (6)$$

где γ – весовой коэффициент из ряда чисел пропорции золотого сечения, когда за целое принята величина условного запаздывания τ_y [10].

Такой способ выбора заданной передаточной функции оптимальной отработки скачка задания регулируемой величины позволяет осуществить физическую реализацию регулятора с динамической компенсацией, а также достигнуть равенства реальной переходной характеристики замкнутой системы, заданной (5), вместо их приближения друг к другу.

Представим передаточную функцию объектов регулирования с условным запаздыванием в общем виде

$$W_{об}(s) = W_{об}^o(s) e^{-\tau_y s}, \quad (7)$$

где $W_{об}^o(s)$ – часть передаточной функции (7), которая не содержит условного запаздывания.

Этой передаточной функции объекта соответствует заданная передаточная функция оптимальной отработки скачка задания замкнутой системы

$$W_{зд}(s) = W_{зд}^o(s) e^{-\tau_{зд} s}. \quad (8)$$

Здесь $W_{зд}^o(s)$ – часть передаточной функции (8), которая не содержит запаздывания, а структура соответствует структуре $W_{об}^o(s)$; $\tau_{зд}$ – заданное значение запаздывания, равное условному запаздыванию передаточной функции объекта [10],

$$\tau_{зд} = \tau_y. \quad (9)$$

Выполнение равенства (9) позволяет достигнуть выполнения условия физической реализуемости оптимального корректирующего регулятора.

Передаточную функцию оптимального регулятора с динамической компенсацией с учетом (7)–(9) находим из условия выполнения равенства

$$W_{зд}(s) = \frac{W_p^{opt}(s)W_{об}^o(s)}{1 + W_p^{opt}(s)W_{об}^o(s)}. \quad (10)$$

Отсюда получаем передаточную функцию оптимального регулятора

$$W_p^{opt}(s) = \frac{W_{зд}(s)}{W_{об}^o(s)[1 - W_{зд}(s)]} = [W_{об}^o(s)]^{-1}W_{зд}^{PC}(s). \quad (11)$$

Здесь $W_{зд}^{PC}(s)$ – заданная передаточная функция разомкнутой системы, равная [3]

$$W_{зд}^{PC}(s) = \frac{W_{зд}(s)}{1 - W_{зд}(s)}. \quad (12)$$

Передаточную функцию оптимального регулятора в виде правой части равенства (11) целесообразно применять для объектов регулирования без запаздывания, передаточные функции разомкнутых систем которых могут быть представлены в виде идеальных или реальных интегрирующих звеньев с инерционностью первого, второго или n -го порядка [10]. При этом заданную передаточную функцию разомкнутой системы для объектов без запаздывания определяют по передаточной функции (12).

Для объектов регулирования с условным запаздыванием с использованием передаточных функций (7), (8) и равенства (9) передаточная функция оптимального регулятора (11) примет следующий вид [10]:

$$W_p^{opt}(s) = W_\phi(s) \frac{1}{1 - W_{зд}^o(s)e^{-\tau_y s}}, \quad (13)$$

где передаточная функция фильтра будет физически реализуема и равна

$$W_\phi(s) = \frac{W_{зд}^o(s)}{W_{об}^o(s)}, \quad (14)$$

где $W_{зд}^o(s)$ – часть передаточной функции (8), которая не имеет условного запаздывания и содержит один параметр динамической настройки оптимального регулятора $T_{зд}$:

$$W_{зд}^o(s) = \frac{1}{(T_{зд}s + 1)^n}, \quad (15)$$

где n – порядок передаточной функции объекта регулирования (7). Выбор численного значения $T_{зд}$ осуществляют с использованием ряда чисел пропорции золотого сечения, приняв за целое численное значение условного запаздывания передаточной функции объекта по каналу управляющего воздействия с учетом максимально допустимой величины регулирующего воздействия:

$$T_{зд} = \gamma\tau_y. \quad (16)$$

Структурные схемы, математические модели типовой и дважды инвариантной систем автоматического регулирования и заданной передаточной функции замкнутой системы

В данной статье в отличие от инвариантной каскадной системы автоматического регулирования с внутренней моделью [11] предложен следующий подход к формированию оптимальной структуры и настройке инвариантной САР, позволяющий существенно повысить качество регулирования: при отработке скачка задания достигнуть полного равенства реальной передаточной функции замкнутой системы и заданной передаточной функции систем с требуемыми прямыми показателями качества; для наиболее опасных внутренних возмущений получить полную инвариантность; при отработке внешних возмущений существенно уменьшить площадь модуля ошибки регулирования, т. е. обеспечить частичную инвариантность с заданными допустимыми отклонениями регулируемого параметра.

Возможности существенного повышения быстродействия и точности регулирования теплоэнергетических параметров с использованием предлагаемых оптимальных регуляторов с динамической компенсацией и комбинированных принципов регулирования покажем на примере дважды инвариантной системы автоматического регулирования температуры перегретого пара паровых котлов.

Для расчета настройки типовых двухконтурных САР температуры перегретого пара обычно используют переходные характеристики по температуре пара за впрыском (опережающий участок) и переходные характеристики инерционного участка пароперегревателя [4]. При экспериментальном определении динамических характеристик объекта регулирования нахождение параметров передаточной функции опережающего участка не возникает трудностей, так как на вход опережающего участка подается скачок впрыска. Однако экспериментально невозможно получить переходную характеристику инерционного участка, поскольку на вход подается не скачок, а переходная характеристика опережающего участка в виде апериодического звена первого или второго порядка. При этом переходную характеристику инерционного участка пароперегревателя, необходимую для расчета параметров динамической настройки САР температуры перегретого

го пара, по большинству из известных методов параметрической оптимизации, находят графическим путем [2], что снижает точность идентификации динамики инерционного участка и ухудшает качество регулирования. Поэтому целесообразно структурно-параметрический синтез инвариантной КСАР осуществить на основе передаточных функций опережающего и главного участков пароперегревателя (вход – скачок управляющего воздействия, выход – температура пара за котлом).

Схемы моделирования переходных процессов типовой САР с дифференциатором, предлагаемой КСАР и заданной передаточной функции замкнутой системы при отработке скачка задания в пакете Simulink, приведены на рис. 1.

Динамика опережающего участка объекта представлена передаточной функцией инерционного звена первого порядка (1).

Структуру стабилизирующего регулятора (СР) находим на базе передаточной функции оптимального регулятора с динамической компенсацией с учетом динамики опережающего участка [10]

$$W_{\text{р1}}^{\text{opt}}(s) = [W_{\text{оп}}(s)]^{-1} W_{\text{зд1}}^{\text{PC}(n=1)}(s), \quad (17)$$

где $[W_{\text{оп}}(s)]^{-1}$ – компенсатор динамики опережающего участка, т/ч/°С; $W_{\text{зд1}}^{\text{PC}(n=1)}(s)$ – заданная передаточная функция разомкнутой системы регулирования в виде идеального интегрирующего звена [12],

$$W_{\text{зд1}}^{\text{PC}(n=1)}(s) = \frac{1}{T_{\text{зд1}}s}, \quad (18)$$

$T_{\text{зд1}}$ – расчетный параметр динамической настройки СР, равный постоянной времени передаточной функции опережающего участка (1):

$$T_{\text{зд1}} = T_{\text{оп}}. \quad (19)$$

Подставив в передаточную функцию стабилизирующего регулятора (17) передаточные функции опережающего участка (1) и разомкнутой системы (18), с учетом (19) получим передаточную функцию СР

$$W_{\text{р1}}^{\text{opt}}(s) = \frac{\kappa_{\text{р1}}(T_{\text{и1}}s + 1)}{T_{\text{и1}}s}, \quad (20)$$

где $T_{\text{и1}} = T_{\text{оп}}$ – время интегрирования, с; $\kappa_{\text{р1}}$ – коэффициент передачи регулятора,

$$\kappa_{\text{р1}} = \frac{T_{\text{оп}}}{\kappa_{\text{оп}}T_{\text{зд1}}}, \quad (21)$$

с учетом равенства (19) находим

$$\kappa_{\text{р1}} = \frac{1}{\kappa_{\text{оп}}} \left(\frac{\text{т/ч}}{\text{°С}} \right). \quad (22)$$

Для устранения влияния характера переходных процессов внутреннего контура КСАР со стабилизирующим регулятором на качество регулирования внешнего контура с корректирующим регулятором (КР) запишем передаточную функцию по регулируемому воздействию x_p при изменении скачка корректирующего воздействия x_k на входе в СР

$$W_{x_p, x_k}(s) = \frac{W_{pl}^{opt}(s)}{1 + W_{pl}^{opt}(s)W_{op}(s)}. \quad (23)$$

Умножив числитель и знаменатель (23) на передаточную функцию опережающего участка (1), получим

$$W_{x_p, x_k}(s) = \frac{W_{pl}^{opt}(s)W_{op}(s)}{[1 + W_{pl}^{opt}(s)W_{op}(s)]W_{op}(s)} = \frac{W_{zdl}^{3C}(s)}{W_{op}(s)}. \quad (24)$$

Здесь $W_{zdl}^{3C}(s)$ – заданная передаточная функция по промежуточной регулируемой величине $y_1(t)$ при скачкообразном изменении задания на входе в СР, равная с учетом (1)

$$W_{zdl}^{3C}(s) = \frac{1}{T_{zdl}s + 1}, \quad (25)$$

где $T_{zdl} = T_{op}$.

Подставив (1) и (25) в (24), с учетом (19) получим

$$W_{x_p, x_k}(s) = \frac{T_{op}s + 1}{K_{op}(T_{zdl}s + 1)} = \frac{1}{K_{op}}. \quad (26)$$

Из равенства (26) следует, что при установке усилителя с коэффициентом передачи K_{op} между входом КР и выходом СР внутренний контур с СР превращается в усилитель с коэффициентом передачи, равным единице, и структуру КР можно определить только по передаточной функции главного участка пароперегревателя (2), которой соответствует заданная передаточная функция замкнутой системы при обработке задания:

$$W_{zdl}(s) = W_{zdl}^o(s)e^{-\tau_y s} = \frac{e^{-\tau_y s}}{(T_{zdl}s + 1)^2}, \quad (27)$$

где $T_{zdl} = \gamma\tau_y$ – параметр динамической настройки КР.

С учетом (26), (27) передаточная функция корректирующего оптимального регулятора примет следующий вид:

$$W_{p2}^{opt}(s) = W_{\phi}(s) \frac{1}{1 - W_{зд2}^o(s) e^{-\tau_y s}}. \quad (28)$$

Здесь передаточная функция (28) физического реализуемого фильтра будет равна

$$W_{\phi}(s) = \frac{W_{зд2}^o(s)}{W_{гл}^o(s)} = \frac{(T_{гл}s + 1)(\sigma_{гл}s + 1)}{\kappa_{гл}(T_{зд2}s + 1)^2}. \quad (29)$$

Для достижения полной инвариантности по отношению к наиболее опасному внутреннему возмущению (температуре перегретого пара до места впрыска), измеряемому дополнительным датчиком, выход которого с минусом подают на вход СР через дифференциатор инвариантности внутреннего возмущения с передаточной функцией, которая обратна передаточной функции СР:

$$W_d(s) = \frac{1}{W_{p1}^{opt}(s)} = \frac{T_{и1}s}{\kappa_{p1}(T_{и1}s + 1)} = \frac{\kappa_d T_d s}{T_d s + 1}, \quad (30)$$

откуда с учетом (22) находим коэффициент усиления дифференциатора и время дифференцирования.

Для существенного уменьшения площади модуля ошибки регулирования при обработке наиболее опасного внешнего возмущения дополнительно измеряют расход перегретого пара, который воздействует на температуру перегретого пара за пароперегревателем в соответствии с передаточной функцией вида

$$W_b(s) = \frac{\kappa_b}{T_b s + 1} = \frac{10}{97,5s + 1}, \quad (31)$$

где κ_b – коэффициент передачи при изменении нагрузки энергоблока на 10 %; T_b – постоянная времени, с.

Передаточную функцию второго устройства инвариантности основной регулируемой величины по отношению к крайнему внешнему возмущению находим из условий компенсации той части передаточной функции главного участка пароперегревателя (2), которая не содержит условного запаздывания и превращения внутреннего контура СР в усилительное звено с единичным коэффициентом передачи также со стороны выхода устройства инвариантности, подключенного с минусом к входу СР. Компенсация условного запаздывания главного участка пароперегревателя достигается введением такого же запаздывания в автоматический задатчик нагрузки парового котла или автоматического задатчика мощности энергоблока. Это позволяет при переходе на другую нагрузку сперва скорректировать задание внутреннему контуру КСАР, а затем в момент времени $t = \tau_y$ перейти на новый уровень нагрузки, превращая систему в инвариантную при плано-

вом изменении нагрузки. Это дает возможность существенно повысить точность отработки внешнего возмущения [10]

$$W_{\text{ук}}(s) = \frac{\kappa_{\text{оп}}\kappa_{\text{в}}(T_{\text{гл}}s + 1)(\sigma_{\text{гл}}s + 1)}{\kappa_{\text{гл}}(T_{\text{в}}s + 1)(T_{\text{зд3}}s + 1)} = \frac{1,19 \cdot 10(45,24s + 1)(7,31s + 1)}{1,77 \cdot (97,5s + 1)(5s + 1)}, \quad (32)$$

где $T_{\text{зд3}} = 5$ с – дополнительная постоянная времени, введенная в знаменатель для физической реализуемости устройства инвариантности внешнего возмущения.

При этом штатные параметры динамической настройки типовой системы автоматического регулирования с дифференцированием (САРД) промежуточной регулируемой величины (рис. 1а) представлены передаточной функцией дифференциатора

$$W_{\text{д}}(s) = \frac{\kappa_{\text{д}}T_{\text{д}}s}{T_{\text{д}}s + 1} = \frac{1,5 \cdot 99s}{99s + 1}, \quad (33)$$

где $\kappa_{\text{д}} = 1,5$ – коэффициент усиления дифференциатора; $T_{\text{д}} = 99$ с – время дифференцирования.

Штатные настройки ПИ-регулятора типовой САР с дифференциатором составляют (рис. 1а)

$$W_{\text{р}}(s) = \frac{\kappa_{\text{р}}(T_{\text{и}}s + 1)}{T_{\text{и}}s} = \frac{1,0(6s + 1)}{6s}, \quad (36)$$

где $\kappa_{\text{р}} = 1,0$ т/ч/°С – коэффициент усиления; $T_{\text{и}} = 6$ с – время интегрирования ПИ-регулятора.

Переходные процессы типовой САР с дифференциатором и ИКСАР с использованием оптимальных регуляторов с динамической компенсацией при плановом изменении нагрузки

Графики переходных процессов типовых САРД и ИКСАР при основных воздействиях приведены на рис. 2, где $\frac{\Delta y}{y}$ – относительное значение основной регулируемой величины.

При отработке задания (рис. 2а) время регулирования ИКСАР с оптимальным регулятором (пунктирная линия) в восемь раз меньше, чем время регулирования типовой САР с дифференциатором (сплошная линия), и в 2,6 раза – по сравнению со временем регулирования ИКСАР с внутренней моделью [11]. При этом окончание переходного процесса (рис. 3) наступает через минимальное время, равное $2\tau_{\text{у}}$. Кроме того, при отработке скачка задания переходные характеристики реальной ИКСАР и заданной передаточной функции системы (27) полностью совпадают, а не приближаются друг к другу, как в [3], так как разница между ними равна нулю (рис. 3).

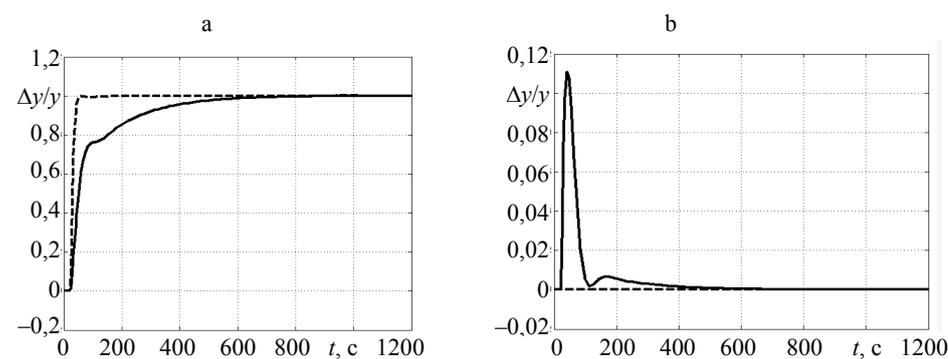


Рис. 2. Графики переходных процессов типовой (сплошные линии) и инвариантной (пунктирные линии) систем автоматического регулирования при отработке основных воздействий: а – скачка задания; б – внутреннего возмущения; в – внешнего возмущения

Fig. 2. Graphs of transients of typical (solid lines) and invariant (dotted lines) automatic control systems when working out the main effects: а – a control action surge; б – internal perturbation; в – external perturbation

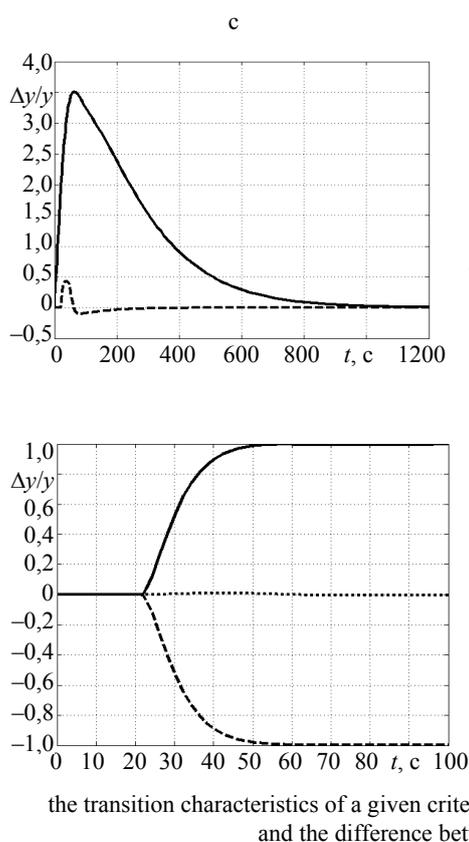


Рис. 3. Графики переходных процессов при отработке задания предлагаемой инвариантной системы автоматического регулирования (сплошная линия), переходной характеристики заданного критерия оптимальной отработки задания (пунктирная линия) и разница между ними (точечная линия)

Fig. 3. Graphs of transients when working out a task of the proposed invariant automatic control system (solid line), the transition characteristics of a given criterion for optimal task processing (dashed line) and the difference between them (dotted line)

При отработке внутреннего возмущения максимальная относительная динамическая ошибка регулирования типовой САРД составляет 0,11 (рис. 1б), а ИКСАР равна нулю за счет полной инвариантности относительно наиболее опасного внутреннего возмущения.

При отработке крайнего внешнего возмущения расходом перегретого пара время регулирования уменьшается в пять раз, максимальная динамическая ошибка регулирования сокращается в 7,3 раза, а модуль площади ошибки регулирования уменьшается в 43 раза по сравнению с типовой САР с дифференциатором, что в 23,8 раза меньше, чем ИКСАР с внутренней моделью [10].

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что для повышения точности идентификации объектов и существенного улучшения качества регулирования ИКСАР при основных воздействиях следует проводить структурно-параметрический синтез систем регулирования на базе передаточных функций опережающего и главного участков пароперегревателя вместо инерционного.

2. Целесообразно внутренний контур КСАР превращать в усилительное звено с единичным коэффициентом передачи для выбора структуры корректирующего регулятора с динамической компенсацией по передаточной функции главного участка пароперегревателя.

3. Передаточная функция стабилизирующего регулятора КСАР должна быть равна произведению обратной передаточной функции опережающего участка, умноженной на заданную передаточную функцию разомкнутой системы в виде идеального интегрирующего звена. При этом время интегрирования стабилизирующего регулятора должно полностью компенсировать постоянную времени апериодического звена первого порядка опережающего участка, а коэффициент передачи должен быть обратно пропорционален коэффициенту передачи опережающего участка.

4. Чтобы устранить влияние переходных процессов внутреннего контура на качество регулирования внешнего контура с корректирующим регулятором, необходимо между выходом последнего и входом стабилизирующего регулятора установить дополнительно усилитель с единичным коэффициентом передачи.

5. Передаточную функцию корректирующего регулятора определяют как произведение обратной передаточной функции главного участка объекта, которая умножена на заданную передаточную функцию замкнутой системы при отработке задания и обратную разность между единицей и заданной передаточной функцией замкнутой системы при отработке задания. При этом КР имеет один расчетный параметр динамической настройки $T_{зд2}$, численные значения которого определяет быстродействие ИКСАР с учетом допустимой величины корректирующего воздействия с выхода КР.

6. Полная инвариантность по отношению к наиболее опасному внутреннему возмущению достигается при условии, что передаточная функция первого дифференциатора инвариантности обратна передаточной функции стабилизирующего регулятора.

7. Существенное повышение быстродействия и точности отработки внешнего возмущения достигается при реализации устройства компенсации наиболее опасного дополнительно измеренного внешнего возмущения в виде двух последовательно соединенных звеньев быстрого реагирования, компенсирующих ту часть передаточной функции главного участка пароперегревателя, которая не содержит условного запаздывания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плетнев, Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учеб. для вузов / Г. П. Плетнев. 4-е изд. М.: Изд-во МЭИ, 2007. 352 с.
2. Клюев, А. С. Наладка систем автоматического регулирования паровых котлов / А. С. Клюев, А. Т. Лебедев, С. И. Новоселов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 280 с.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб.: в 3 т. / под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. Т. 2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления. 736 с.
4. Ротач, В. Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования / В. Я. Ротач. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. 344 с.
5. Ротач, В. Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования / В. Я. Ротач. М.: Энергия, 1973. 440 с.
6. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов / В. Я. Ротач. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 396 с.
7. Широкий, Д. К. Расчет параметров промышленных систем регулирования: справ. пособие / Д. К. Широкий, О. Д. Куриленко. К.: Техніка, 1972. 232 с.
8. Анхимюк, В. Л. Теория автоматического управления: учеб. пособие / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев. Минск: Дизайн ПРО, 2000. 352 с.
9. Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. Минск: БГТУ, 2010. 574 с.
10. Теория автоматического управления: учеб. пособие / Г. Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г. Т. Кулакова. Минск: Вышэйшая школа, 2022. 197 с.
11. Кулаков, Г. Т. Синтез инвариантных систем автоматического регулирования с внутренней моделью / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, Н. В. Воюш // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 6. С. 539–550. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-539-550>.
12. Коновалов, М. А. Проблемы автоматизации инерционных теплоэнергетических объектов / М. А. Коновалов. К.: Феникс, 2009. 312 с.
13. Кулаков, Г. Т. Параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в режиме постоянного давления пара перед турбиной / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, К. И. Артёменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-451-462>.
14. Кулаков, Г. Т. Параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в режиме переменного давления пара перед турбиной / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, К. И. Артёменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 540–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-539-551>.
15. Артёменко, К. И. Структурно-параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в широком диапазоне изменения нагрузок / К. И. Артёменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 469–481. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-469-481>.
16. Кулаков, Г. Т. Синтез котельных регуляторов системы автоматического управления мощностью энергоблоков / Г. Т. Кулаков, К. И. Артёменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 3. С. 223–235. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-223-235>.

Поступила 17.02.2023 Подписана в печать 25.04.2023 Опубликовано онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. Pletnev G. P. (2007) *Automation of Technological Processes and Productions in Thermal Power Engineering*. 4th Ed. Moscow, MEI Publishing House. 352 (in Russian).

2. Klyuev A. S., Lebedev A. T., Novoselov S. I. (1985) *Adjustment of Automatic Control Systems of Steam Boilers*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 280 (in Russian).
3. Egupov N. D. (ed.) (2000) *Methods of Classical and Modern Theory of Automatic Control: Textbook in 3 Volumes. Vol. 2: Synthesis of Regulators and Theory of Optimization of Automatic Control Systems*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 736 (in Russian).
4. Rotach V. Ya. (1961) *Calculation of the Dynamics of Industrial Automatic Control Systems*. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 344 (in Russian).
5. Rotach V. Ya. (1973) *Calculation of Dynamics of Industrial Automatic Control Systems*. Moscow, Energiya Publ. 440 (in Russian).
6. Rotach V. Ya. (2008) *Theory of Automatic Control. 5th Ed.* Moscow, MEI Publishing House. 396 (in Russian).
7. Shirokii D. K., Kurylenko O. D. (1972) *Calculation of Parameters of Industrial Control Systems*. Kyiv, Tekhnika Publ. 232 (in Russian).
8. Ankhimuk V. L., Opeyko O. F., Mikheev N. N. *Theory of Automatic Control: a Textbook for University Students of Electrical Engineering Specialties*. Minsk, Dizain PRO Publ. 352 (in Russian).
9. Kuzmitskii I. F., Kulakov G. T. (2010) *Theory of Automatic Control*. Minsk, BSTU. 574 (in Russian).
10. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Kravchenko V. V., Kukhorenko A. N., Voyush N. V. (2022) *Theory of Automatic Control*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 197 (in Russian).
11. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Voyush N. V. (2022) Synthesis of Invariant Automatic Control Systems with an Internal Model. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 539–550. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-539-550> (in Russian).
12. Konovalov M. A. (2009) *Problems of Automation of Inertial Thermal Power Facilities*. Kyiv, Feniks Publ. 312 (in Russian).
13. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Artsiomenka K. I. (2018) Parametric Optimization for Automatic Control System of 300 MW Power Units at a Constant Steam Pressure Upstream of the Turbine. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-451-462> (in Russian).
14. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Artsiomenka K. I. (2018) Parametric Optimization for Automatic Control System of Power Units of 300 MW for the Mode of Variable Pressure of Turbine Inlet Steam. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 539–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-539-551> (in Russian).
15. Artsiomenka K. I. (2019) Structural-and-Parametric Optimization of Automatic Control System for Power Units of 300 MW in Wide Range of Load Variations. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (5) 469–481. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-469-481> (in Russian).
16. Kulakov G. T., Artsiomenka K. I. (2020) Synthesis of Boiler Controllers of the Automatic Power Control System of Power Units. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (3), 223–235. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-223-235> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-50-65>

УДК 532.5+621.181.7

Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов

Часть 3

Ю. П. Ярмольчик¹⁾, Р. Шрёгер²⁾, Х. Хаберфельнер²⁾, М. Пихлер²⁾,
Д. Костич²⁾, Г. В. Мороз³⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Компания DUMAG GmbH (Гумпольдскирхен, Австрийская Республика),

³⁾РУП «Белнипиэнергопром» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Для решения проблемы полезной утилизации (сжигание в теплогенераторах) жидких и газообразных отходов промышленного производства, определенных в части 1 статьи, были рассмотрены процессы теплопередачи в теплогенерирующих установках (часть 2 статьи). Для эффективного решения этой задачи применяется комплекс оборудования, состоящего из горелочного устройства и камеры сгорания с передачей теплоты внешнему теплоносителю, например топка котла или котел-утилизатор. В настоящей статье рассмотрен пример расчета подобного процесса для характерной смеси отходов предприятия химической промышленности с применением моделирования возможных схем системы пламенного сжигания характерной комбинации различных видов газообразных и жидких горючих продуктов. Для этого был применен метод вычислительной гидродинамики CFD (Computational fluid dynamics), который определяется как наиболее эффективный при анализе поведения потоков сред и процессов горения. CFD-анализ позволяет прогнозировать гидродинамические и тепловые процессы (особенно в сложных многокомпонентных системах) и оптимизировать их для достижения наилучших результатов. Важнейшим фактором качественного сжигания является процесс атомизации (мелкодисперсного распыления) высоковязких жидкостей с большими коэффициентами поверхностного натяжения. Наиболее эффективным для таких жидкостей принят ультразвуковой способ. Кроме того, рассматривается качество распределения потоков сгорающих смесей и дымовых газов в камере сгорания. Для этого необходимо организовать отдельные потоки осевого и периферийного воздуха, которые позволяют не только изменять конфигурацию пламени, но и направлять конвективные потоки дымовых газов в наиболее эффективные области камеры сгорания. В статье рассмотрены различные варианты теплообмена (конвективного и лучевого) в зависимости от разных факторов, учитывая степень вероятности образования загрязняющих веществ (прежде всего NO_x) в продуктах сгорания. Приведены результаты численного решения поставленной задачи. Проведен анализ результатов по оптимальному соотношению долей первичного и вторичного потоков воздуха на горение. В заключение приведен сравнительный анализ вариантов сжигания топлива непосредственно в котле и предварительной камере сгорания. Показана эффективность прямого сжигания.

Ключевые слова: мультитопливная горелка, метод вычислительной гидродинамики, распределение потоков, конфигурация пламени, теплообмен

Для цитирования: Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 3 / Ю. П. Ярмольчик [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 1. С. 50–65. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-50-65>

Адрес для переписки

Ярмольчик Юрий Петрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
dr.yury.yarmolchick@gmail.com

Address for correspondence

Yarmolchick Yury P.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
dr.yury.yarmolchick@gmail.com

Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces

Part 3

Yu. P. Yarmolchick¹⁾, R. Schröger²⁾, H. Haberfelner²⁾, M. Pichler²⁾,
D. Kostić²⁾, G. V. Moroz³⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Dumag GmbH (Gumpoldskirchen, Republic of Austria),

³⁾RUE “Belniplerienergoprom” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. To solve the problem of useful utilization (by combustion in heat generators) of liquid and gaseous industrial waste (that was defined in Part 1 of the present article), heat transfer processes in heat generating units were considered in Part 2. The main equipment for the effective solution of this process is a burner device and a combustion chamber with heat transfer to an external heat carrier, for example, a boiler furnace or a heat recovery boiler. The present article considers an example of calculating such a process for a distinctive mixture of waste from a chemical industry enterprise using modeling of possible schemes of a flame combustion system for a characteristic combination of various types of gaseous and liquid combustible products. For this purpose, the CFD (Computational Fluid Dynamics) computational hydrodynamics method was applied, which is determined to be the most effective one, in analyzing the behavior of media flows and combustion processes. CFD analysis makes it possible to predict hydrodynamic and thermal processes (especially in complex multicomponent systems) and optimize them to achieve the best results. The most important factor in high-quality combustion is the atomization process (fine atomization) of highly viscous liquids with high surface tension coefficients. The ultrasonic method has been adopted as the most effective for such liquids. Besides, the quality of the distribution of flows of combustion mixtures and flue gases in the combustion chamber is considered. For doing this, it is necessary to arrange separate flows of axial and peripheral air, which make it possible not only to change the configuration of the flame, but also to direct convective flue gas flows to the most efficient areas of the combustion chamber. The article considers various options for heat transfer (convective and radial) depending on various factors, taking into account the degree of probability of formation of pollutants (primarily NO_x) in combustion products. The results of the numerical solution of the problem are presented. The analysis of the results on the optimal ratio of the shares of primary and secondary air flows for combustion was carried out. In conclusion, a comparative analysis of the options for burning fuel directly in the boiler and in the pre-combustion chamber is presented. The efficiency of direct combustion has been demonstrated.

Keywords: multifuel burner, computational hydrodynamics method, flow distribution, flame configuration, heat transfer

For citation: Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Haberfelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V. (2024) Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 3. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (1), 50–65 <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-50-65> (in Russian)

Постановка задачи и цель исследования

Рассмотрим пример прямого сжигания технологических отходов [1] непосредственно в топке парового котла. При прямом сжигании в первой секции котла тепловая энергия передается к его стенкам в основном за счет излучения. Вторая секция опциональна для достаточного времени пребывания дымовых газов в зоне теплопередачи [2]. Третья секция имеет теплообменники для достижения желаемой эффективности котла и для перегрева пара от температуры насыщения 250 до 430 °С. Наконец, экономайзер

используется для предварительного нагрева воды до температуры, близкой к температуре насыщения пара. На рис. 1 представлен общий обзор процесса в водотрубном вертикальном трехсекционном котле с экономайзером с указанием потоков энергоносителей и их характерных температур.

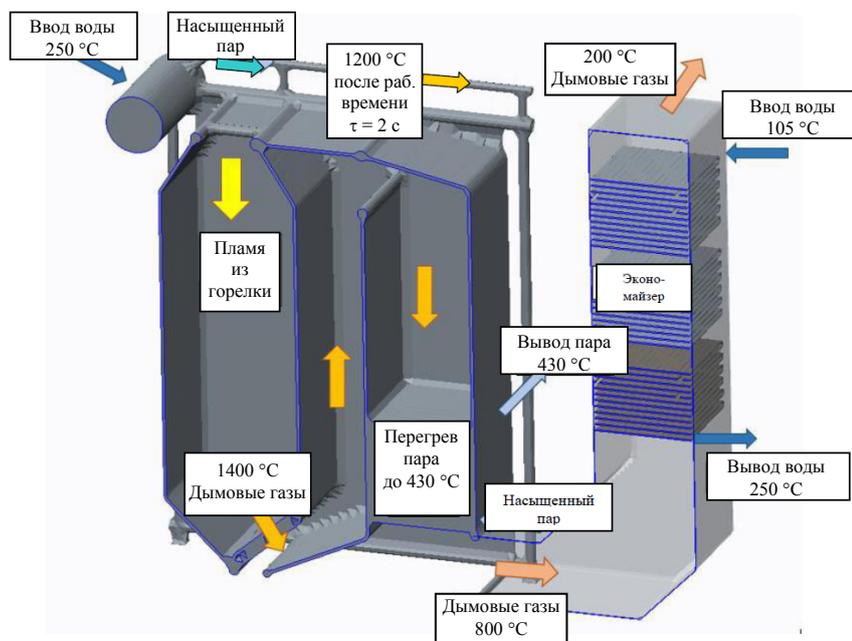


Рис. 1. Схема котла

Fig. 1. Scheme of Boiler

Целью настоящего исследования является показать эффективность:

- использования котла с прямым сжиганием отходов в топке;
- применения мультитопливного горелочного устройства с индивидуально контролируемым распределением воздуха (типа IBX от компании DUMAG).

В процессе исследования методом вычислительной гидродинамики (CFD-анализ) были смоделированы процессы факельного сжигания [3] мультитопливной горелкой одновременно нескольких характерных видов промышленных газообразных и жидких отходов непосредственно в топке котла при разном соотношении осевого и периферийного воздушных потоков [4]. В качестве проектного решения рассматривался вертикальный водотрубный котел паропроизводительностью 30 т/ч с температурой перегрева пара 430 °С. Основная цель этого анализа – определить температурные поля, скорости потоков, длину пламени, радиационные и конвективные поверхности. Преимущество мультитопливной горелки со ступенчатым подводом воздуха для горения (в качестве аналога рассматривалась горелка DUMAG IBX) – оптимальное распределение температуры на стенках котла, что приводит к повышению энергоэффективности и увеличению продолжительности эксплуатации. Это достигается, прежде всего, за счет

распределения расходов и направления воздуха для горения по двум ступеням – осевому и периферийному с тангенциальной закруткой потока.

Физико-химические свойства компонентов топлива

В качестве характерного примера компонентов, поступающих в горелочное устройство по независимым топливопроводам, рассматривались фракции метанола (смесь из продувочных, танковых и эфирных газов), X-масел и МЭА (моноэтаноламин $\text{NH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$) с использованием природного газа в качестве топлива подсветки. Топливо подсветки (обычно – природный газ) необходимо не только для стабилизации горения, но и для поддержания теплогенератора на требуемой мощности. Система включает в себя линии клапанов безопасности и регулирования для каждой среды, мультитопливную горелку со всеми принадлежностями, систему контроля, а также водотрубный котел с датчиками и системой управления. Мультитопливная горелка типа IBX DUMAG используется для непрерывного сжигания технологических сред в любой комбинации вместе с природным газом. Дымовой газ служит энергоносителем для парового котла. Характеристики потоков и свойства применяемых топлив представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики потоков и свойства применяемых топлив
Characteristics of flows and properties of fuels used

1. Природный газ	
Расход, мин./макс., $\text{нм}^3/\text{ч}$	260/2600
Температура, $^{\circ}\text{C}$	20
Давление избыточное, бар	1,5
Плотность, $\text{кг}/\text{нм}^3$	0,78
Низшая теплота сгорания (H_v), $\text{МДж}/\text{нм}^3$	33,54
2. Фракция метанола (смесь из трех газов: продувочных, танковых и эфирных)	
Расход, мин./макс., $\text{нм}^3/\text{ч}$	740/3700
Температура, $^{\circ}\text{C}$	20
Давление избыточное, бар	0,06
Плотность, $\text{кг}/\text{нм}^3$	0,65
Низшая теплота сгорания (H_v), $\text{МДж}/\text{нм}^3$	9,69
3. X-масла (жидкий остаток, состоящий из различных тяжелых масел)	
Расход, мин./макс., $\text{кг}/\text{ч}$	73/365
Температура, $^{\circ}\text{C}$	20
Давление избыточное, бар	0,5
Плотность, $\text{кг}/\text{нм}^3$	911
Низшая теплота сгорания (H_v), $\text{МДж}/\text{кг}$	38,274
4. МЭА (жидкий остаток, состоящий из различных эфиров)	
Расход, мин./макс., $\text{кг}/\text{ч}$	380/1900
Температура, $^{\circ}\text{C}$	60
Давление избыточное, бар	0,08
Плотность, $\text{кг}/\text{нм}^3$	1055
Низшая теплота сгорания (H_v), $\text{МДж}/\text{кг}$	17,672

Проектные данные

В табл. 2 приведены данные, которые представляют собой базовые значения для расчета системы «горелка – котел» при работе на максимальной мощности, основанной на методике CFD-анализа.

Таблица 2

Проектные данные для максимальной мощности

Design data for maximum capacity

№ п/п	Наименование	Теплота сгорания низшая, кВт·ч/кг	Теплота сгорания низшая, кВт·ч/нм ³	Плотность, кг/нм ³ кг/м ³	Расход, кг/ч	Расход, нм ³ /ч	Мощность входа на горелку, МВт	Характеристика общего входа горелки, МВт	Фазовое состояние
Среда 1	Природный газ	11,86	9,28	0,78	20	25	0,26	0,02	Газ
Среда 2	Продувочный газ	5,62	2,65	0,47	1.417	3.000	8,67	0,71	Газ
Среда 3	Танковые газы	1,54	2,1	1,35	811	600	1,37	0,12	Газ
Среда 4	Эфирные газы	4,76	7,64	1,60	160	100	0,84	0,07	Газ
Среда 5	Х-масла	10,63	9.694,23	911,83	365	0	4,28	0,40	Жидкость
Среда 6	МЭА	4,91	5.142,25	1.047,54	1.900	2	10,27	0,94	Жидкость

$\Sigma = 25.68 \text{ МВт}$

Для определения основных характеристик системы «горелка – котел» рассчитаны усредненные значения (табл. 3). Они позволяют определить конструкционные размеры для основных комплектующих горелочного устройства, прежде всего внутренних патрубков топливоподдачи, смесительного устройства, запальной (пилотной) горелки, насадок ультразвуковых распылителей [5], воздухопроводов. Необходимо обратить внимание на то, что с увеличением доли воздуха, поступающего на горение по осевому патрубку, повышается длина пламени, которую необходимо спроецировать на длину топки так, чтобы пламя не доставало до задней стенки. При близких значениях длин пламени и топки требуется уменьшить его длину путем перевода доли воздуха на горение на воздухопровод периферийного подвода.

В табл. 4 приведены данные, которые представляют собой базовые значения для расчета системы «горелка – котел» при работе на минимальной мощности и при диапазоне глубины регулирования горелкой 1:5. Предполагается, что в этом случае горелка будет сжигать только природный газ, так как при изменении расходов опциональных топлив поддержание стабильного горения при малой мощности усложняется, а эффективность утилизации промышленных отходов нивелируется. Таким образом, представляется рациональным в этом случае применять для сжигания монотопливо.

Таблица 3

Расчет для всех сред вместе с расходами для максимальной мощности
 Calculation for all media together with the consumption for maximum capacity

Общая мощность	25,68	МВт		
Средняя теплота сгорания	5,01	кВт·ч/кг =	18,0	МДж/кг
Средняя теплота сгорания	6,28	кВт·ч/нм ³ =	22,6	МДж/нм ³
Стехиометрическое количество воздуха	5,6	нм ³ /нм ³ =	5,76	кг/кг
Коэффициент избытка воздуха λ	1,20	–		
Требуемый расход воздуха	25,151	нм ³ /ч	При температуре дымовых газов 1097 °С	
Температура воздуха на горение	240	°С		
Объем дымовых газов (влажных)	28,662	нм ³ /ч		
Остаточный кислород (влажные дымовые газы)	3,00	%		
Остаточный кислород (сухие дымовые газы)	3,67	%		
Давление в камере сгорания	–2,00	мбар (избыточное)		

Таблица 4

Расчет для природного газа с расходом для минимальной мощности
 Calculation for natural gas with the consumption for minimum capacity

Общая мощность	5,34	МВт		
Средняя теплота сгорания	11,86	кВт·ч/кг =	42,7	МДж/кг
Средняя теплота сгорания	9,28	кВт·ч/нм ³ =	33,4	МДж/нм ³
Стехиометрическое количество воздуха	9,2	нм ³ /нм ³ =	15,02	кг/кг
Коэффициент избытка воздуха λ	1,20	–		
Требуемый расход воздуха	5,714	нм ³ /ч	При температуре дымовых газов 1097 °С	
Температура воздуха на горение	240	°С		
Объем дымовых газов (влажных)	6,183	нм ³ /ч		
Остаточный кислород (влажные дымовые газы)	3,16	%		
Остаточный кислород (сухие дымовые газы)	3,79	%		
Давление в камере сгорания	–2,00	мбар (избыточное)		

CFD-моделирование

Для расчета процессов горения часто используется CFD-программа Simcenter FloEFD от Siemens Digital Industries. Это полностью интегрированное с САПР программное обеспечение с мультифизическими функциями, позволяющее выполнять моделирование потоков и термический анализ с использованием собственных данных геометрии камеры сгорания. Однако в камере сгорания очень важную функцию выполняет лучистый теплообмен, который не входит в пакет указанного программного обеспечения. Помимо этого, оно не имеет возможности ограничить химические реакции. Экспериментальные установки и связанные с ними сопутствующие затраты значительно дороже CFD-моделирования. Кроме того, такой подход более надежен, так как имеет возможность прогнозировать работу системы в более широком диапазоне, чем это позволяет натурное эксперименталь-

ное исследование. Особенно это важно для прогнозирования выбросов загрязняющих веществ. Однако FloEFD не поддерживает эту функцию из-за базовой архитектуры. Программное обеспечение имеет узкие ограничения в приложениях со сложными составами или несколькими различными видами топлива. Для охвата широкого спектра моделирования CFD и достижения более точных результатов требуется использовать программный продукт с дополнительным функционалом. В результате большого количества экспериментальных испытаний приняты основные эмпирические уравнения, приведенные в [1, 2], которые позволили создать программное обеспечение совместно с ACAM Engineering [6]. Однако для него требуется ручной ввод всех критериев в виде математических формул (в 20 раз больше времени в сравнении с Simcenter FloEFD). В результате создано программное обеспечение Simcenter STAR-CCM+ от Siemens Digital, которое охватывает физические темы, выходящие далеко за рамки моделирования течения жидкости и теплопередачи, и позволяет проводить профессиональную обработку через сеть посредством мультифизического моделирования и анализа данных для фотореалистичной визуализации. Однако стоимость лицензии Simcenter STAR-CCM+ также выше, чем у FloEFD. Принятый для подобных типов задач продукт является экономичной альтернативой для многих проектов. Simcenter FloEFD также показал явное превосходство, если рассматривается моделирование взаимодействия между жидкостью и твердыми телами (особенно для периферийных потоков и теплообмена – так называемой технологии интеллектуальных ячеек). Поэтому для подобных задач было решено продолжать использовать Simcenter FloEFD для стандартных расчетов и при необходимости Simcenter STAR-CCM+ для лучшего представления синтезируемых задач физики и химии. Расширенное моделирование также снижает конструктивный риск и уменьшает количество тестовых запусков. В результате для настоящего исследования использована комбинация пакетов Simcenter FloEFD и Simcenter STAR-CCM+, которая значительно расширяет возможности моделирования.

Результаты исследования

CFD-модель включала в себя конструктивную систему, состоящую из двух элементов – первой секции вертикального водотрубного котла, в объеме которой происходит непосредственно горение указанных выше сред, и смонтированной сверху котла мультитопливной горелки типа IBX DUMAG.

С применением CFD-анализа проведен программный расчет, который позволил получить прогнозирование: температурных полей, скоростей потоков, расчетной длины пламени, радиационных и конвективных поверхностей.

Внутренние стенки котла были настроены на температуру 400 °С.

Вначале выполнялся внутренний анализ без учета конвективного переноса теплоты через внешние стенки котла. Абсолютные значения, показанные в этом анализе, не совсем точны. Но тенденции очевидны.

Применяемая модель горения определена «без предварительной смеси топлив», поскольку реакции происходят во временных масштабах, на

несколько величин меньших, чем скорости потока. Поэтому для кинетических наблюдений важно только время смешивания топлива и окислителя.

Далее были рассмотрены два типичных случая: сжигание монотоплива – природного газа и комбинации газообразных и жидких сред (табл. 2). Такой подход выбран для того, чтобы объяснить влияние сжигания топлива на передачу энергии стенкам, особенно в первой секции котла, где теплообмен излучением является доминирующим.

Простой вариант для исследования данной системы – сжигание одного вида топлива с легкопрогнозируемыми химическими реакциями (природного газа) при следующих условиях распределения потоков в горелке: объемный расход природного газа 2500 м³/ч; массовый расход природного газа 1956 кг/ч; общий массовый расход воздуха 35256 кг/ч; первичный воздух ($\alpha = 0,7$) 20566 кг/ч; вторичный воздух ($\alpha = 0,5$) 14690 кг/ч.

Вначале были определены температурные поля (рис. 2).

Второй шаг расчета – определение полей скоростей (рис. 3).

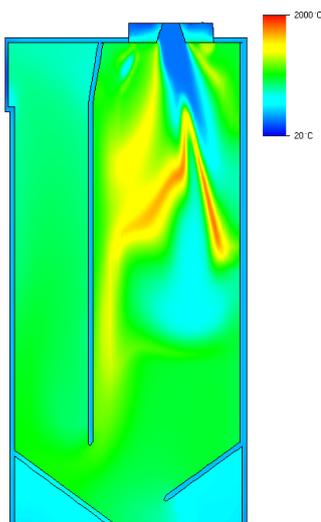


Рис. 2. Температурное поле в котле при сжигании природного газа: $t_{\max} = 2013,6$ °C; $t_{\min} = 19,9$ °C; итераций 603
Fig. 2. The temperature field in the boiler when burning natural gas: $t_{\max} = 2013.6$ °C; $t_{\min} = 19.9$ °C; 603 iterations

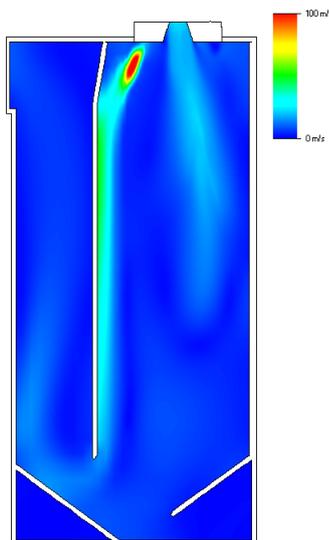


Рис. 3. Поле скоростей в котле при сжигании природного газа: $v_{\max} = 154,6$ м/с; $v_{\min} = 0$; итераций 603
Fig. 3. The velocity field in the boiler when burning natural gas: $v_{\max} = 154.6$ m/s; $v_{\min} = 0$; 603 iterations

Затем были рассчитаны температурные поля в объеме факела и конфигурация пламени при различных массовых долях топлива (рис. 4).

И в завершение первого этапа проведены расчеты плотности излучения (рис. 5) и конвективных потоков (рис. 6) на стенки котла в Вт/м².

Далее рассчитаны альтернативные варианты при других долях распределения первичного (периферийного) и вторичного (осевого) воздуха ($\alpha_1/\alpha_2 = 0,9/0,3$; $0,5/0,7$).

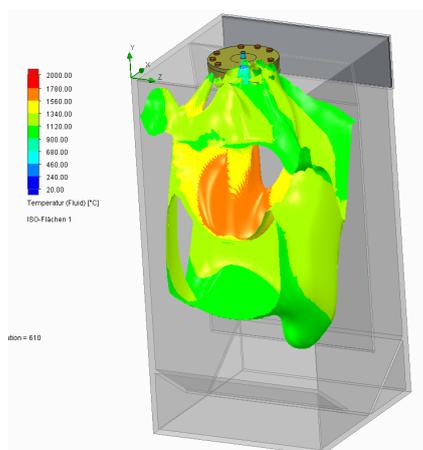


Рис. 4. Массовая доля топлива 0,0597; итераций 610

Fig. 4. Mass fraction of fuel is 0.0597; 610 iterations

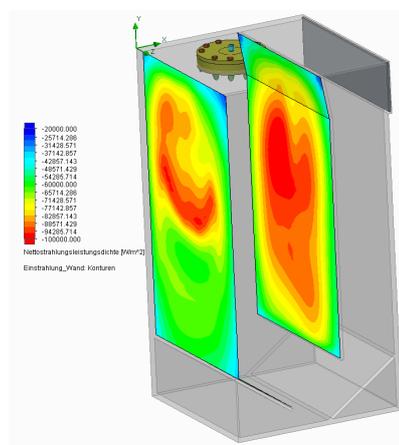


Рис. 5. Излучение к стенкам

Fig. 5. Radiation to the walls

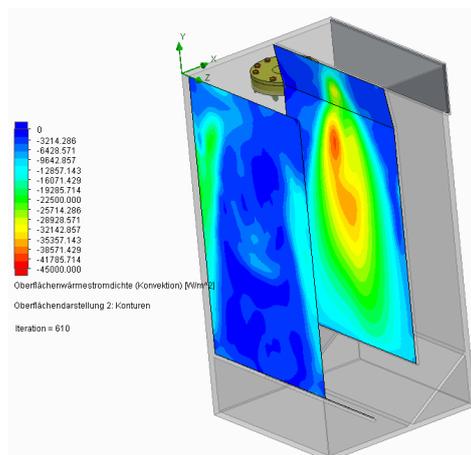


Рис. 6. Конвекция к стенкам

Fig. 6. Convection to the walls

Вторичный воздух служит трем целям:

- «толкает» пламя в определенном направлении, может удлинить его или укоротить (геометрия и расположение пламени важны для оптимизации излучения на стены);

- влияет на характер потока внутри камеры сгорания, создавая так называемые зоны рециркуляции, которые крайне важны для более равномерного распределения конвекционных потоков;

- уменьшает образование загрязняющих веществ, потому что сгоревшие газы рециркулируют в корень пламени, где СО образуется в стехиометрических условиях. В результате СО окисляется до СО₂.

А вероятность образования NO по тепловому механизму Зельдовича значительно уменьшается [7]. Надо отметить, что доля первично образовавшихся молекул NO, в основном за счет топливного азота и «быстрого» механизма, не велика. Поэтому такой способ понижения выбросов оксидов азота весьма эффективный [8] и соответствует принятым нормам [9].

Таким образом, оптимизация подачи вторичного воздуха имеет решающее значение для качества работы системы. В результате анализа было выбрано наиболее оптимальное соотношение $\alpha_1/\alpha_2 = 0,7/0,5$ для данной камеры сгорания – первой секции вертикального водотрубного котла с верхним монтажом мультитопливной горелки.

Следующий этап исследования – моделирование системы для принятого комплекса топлив. Состав топлива определяется путем объединения всех видов топлива, вводимых через сепаратные патрубки горелки. Хотя исходное топливо является и жидким, и газообразным, полученная смесь представляет собой газ, если предположить, что процесс испарения жидкостей не влияет на изучаемое поведение. Это предположение верно, так как при использовании технологии ультразвукового сопла DUMAG капли настолько малы, что не влияют на структуру потока за пределами блока горелки. Кроме того, эти капли жидких фракций очень быстро испаряются, что также важно для модели сжигания (без предварительного смешивания).

В результате испарения жидких фракций и перемешивания их с газообразным топливом результирующий газ, рассчитанный программой Simcenter STAR-CCM+ с функционалом химических реакций, имеет состав, % по массе: C – 37,4903; H – 9,6483; freies H – 0; S – 0; O – 38,2878; freies O – 0; N – 14,5735. Или в виде общей формулы $C_3H_9,2O_2,3N$ [10]. Этот топливный газ в дальнейшем был использован для CFD-анализа на этапе моделирования процессов для принятой задачи. В процессе расчетов получены следующие результаты: температурное поле в первой секции котла (рис. 7); поле скоростей в первой секции котла (рис. 8); геометрия пламени (рис. 9); плотность мощности излучения на стенки топки, кВт/м² (рис. 10); плотность мощности конвективных потоков на стенки топки, кВт/м² (рис. 11).

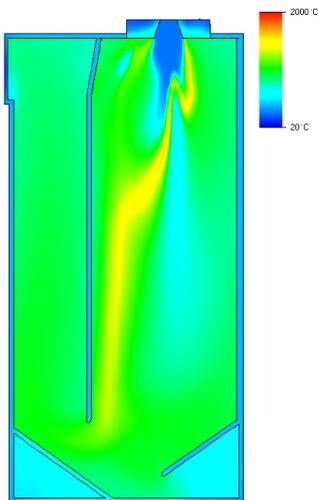


Рис. 7. Конвергентные результаты: температурное поле в котле при сжигании топливного газа: $t_{\max} = 1886,75$ °C; $t_{\min} = 19,3$ °C; итераций 481

Fig. 7. Convergent results: temperature field in the boiler when burning fuel gas: $t_{\max} = 1886.75$ °C; $t_{\min} = 19.3$ °C; 481 iterations

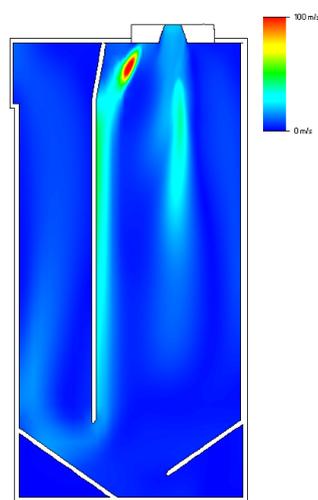


Рис. 8. Конвергентные результаты: поле скоростей в котле при сжигании топливного газа: $v_{\max} = 162,1$ м/с; $v_{\min} = 0$; итераций 481

Fig. 8. Convergent results: the velocity field in the boiler when burning fuel gas: $v_{\max} = 162.1$ m/s; $v_{\min} = 0$; 481 iterations

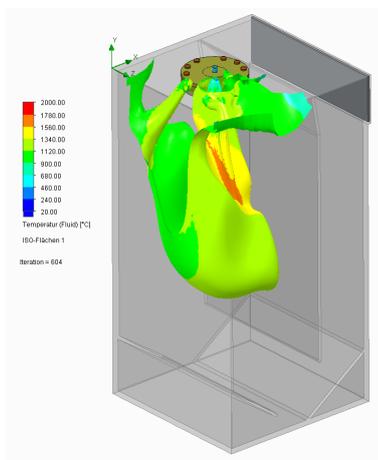


Рис. 9. Массовая доля топлива 0,143; итераций 604

Fig. 9. Mass fraction of fuel 0.143; 604 iterations

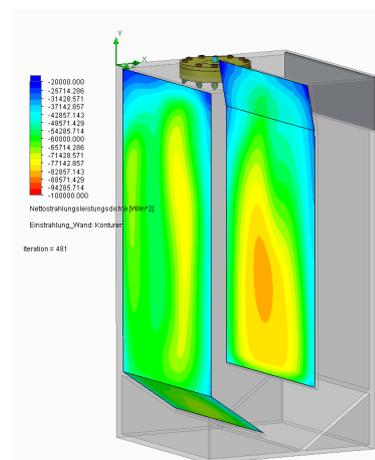


Рис. 10. Излучение к стенкам (итераций 481)

Fig. 10. Radiation to the walls (481 iterations)

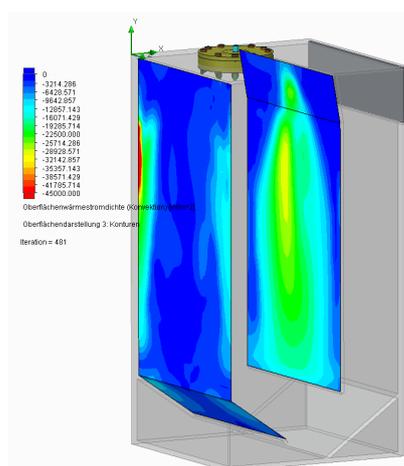


Рис. 11. Конвекция к стенкам (итераций 481)

Fig. 11. Convection to the walls (481 iterations)

Следующим этапом исследования были расчеты для результирующего топливного газа (подобно, как ранее для природного газа) для альтернативных вариантов при других долях распределения первичного (периферийного) и вторичного (осевого) воздуха ($\alpha_1/\alpha_2 = 0,9/0,3; 0,5/0,7$). В результате получены соответствующие тепловые и массовые поля распределения в топке выбранной модели котла.

По полученным результатам проведено сравнение теплообменных профилей на стенках выбранной модели котла при горении реальной топливо-воздушной композиции для теплоотдачи излучением (рис. 12) и конвекции (рис. 13).

Далее необходимо определить объемное температурное поле внутри котла с целью получения картины распределения

потока дымовых газов [11]. Установлено наличие высокотемпературных участков как на поверхностях, что приводит к их перегреву, так и в отдельных объемных областях [12], что увеличивает вероятность образования молекул NO по тепловому механизму Зельдовича. CFD-моделирование для разных соотношений первичного и вторичного потоков воздуха: $\alpha_1/\alpha_2 = 0,7/0,5$ (рис. 14) и $\alpha_1/\alpha_2 = 0,9/0,3$ (рис. 15) показало, что в случае $\alpha_1/\alpha_2 = 0,9/0,3$ образуются некоторые объемы, в которых температуры имеют критические значения. Таким образом, было выявлено, что не только для условий теплоотдачи к теплообменным поверхностям котла, но и с точки зрения распределения внутренних потоков дымовых газов условие распределения первичного и вторичного воздуха $\alpha_1/\alpha_2 = 0,7/0,5$ предпочтительнее других вариантов.

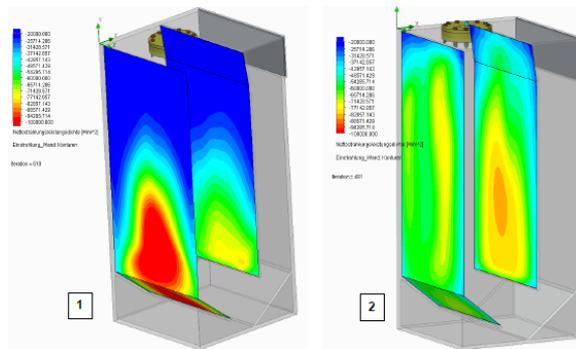


Рис. 12. Сравнение теплоотдачи излучением в зависимости от соотношения первичного и вторичного воздуха: 1 – $\alpha_1/\alpha_2 = 0,9/0,3$; 2 – $0,7/0,5$ (теплоотдача излучением на 30 % больше на изображении 2)

Fig. 12. Comparison of heat transfer of radiation depending on the ratio of primary and secondary air: 1 – $\alpha_1/\alpha_2 = 0.9/0.3$; 2 – $0.7/0.5$ (heat transfer by radiation is 30 % more in image 2)

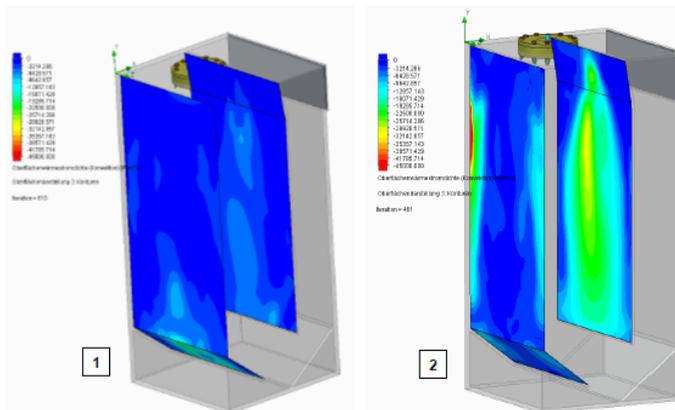


Рис. 13. Сравнение теплоотдачи конвекцией в зависимости от соотношения первичного и вторичного воздуха. 1 – $\alpha_1/\alpha_2 = 0,9/0,3$; 2 – $0,7/0,5$ (теплоотдача конвекцией в три раза больше на изображении 2)

Fig. 13. Comparison of heat transfer by convection depending on the ratio of primary and secondary air: 1 – $\alpha_1/\alpha_2 = 0.9/0.3$; 2 – $0.7/0.5$ (heat transfer by convection is 3 times more in image 2)

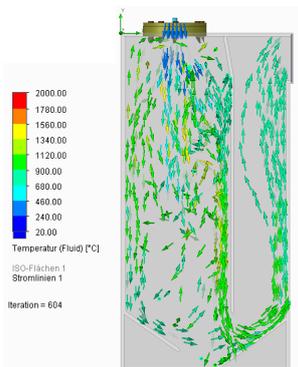


Рис. 14. Реальное топливо. Распределение потока $\alpha_1/\alpha_2 = 0,7/0,5$

Fig. 14. Real fuel. Flow distribution $\alpha_1/\alpha_2 = 0.7/0.5$

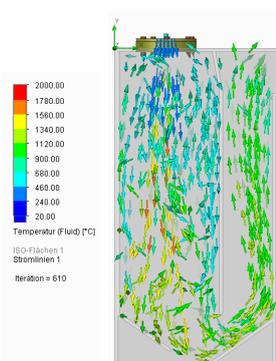


Рис. 15. Реальное топливо. Распределение потока $\alpha_1/\alpha_2 = 0,9/0,3$

Fig. 15. Real fuel. Flow distribution $\alpha_1/\alpha_2 = 0.9/0.3$

Преимущества систем прямого сжигания в топке котла

Эксплуатационные службы систем сжигания промышленных отходов обычно предпочитают применение отдельной камеры сгорания с последующей подачей очищенных дымовых газов в теплогенератор (обычно в котел) [12]. Это связано в основном с боязнью загрязнения теплообменных поверхностей «липкими» недогоревшими субстанциями. Однако такой подход сильно снижает эффективность системы, а применение ультразвукового распыления сильно нивелирует негативные последствия сжигания сложных топлив. Исследование подтвердило эффективность выбора системы прямого сжигания сложных топлив непосредственно в топках котлов. Его основные результаты – определение преимуществ систем прямого сжигания в топках котлов (1-й секции):

- 1) более низкие эксплуатационные расходы благодаря более высокой эффективности системы;
- 2) стабильная геометрия пламени, отличная реакция на колебания нагрузки, пар высокой чистоты;
- 3) ускоренный пуск системы;
- 4) простой и быстрый монтаж системы;
- 5) меньшие размеры рабочей площадки.

1. Более низкие эксплуатационные расходы. Первый и самый важный момент – это общая эффективность системы, то есть при одинаковом количестве сжигаемого природного газа или альтернативных видов топлива выход пара будет больше. Причиной этого являются дополнительные потери теплоты и динамической энергии потока дымовых газов в системе «предварительная камера сгорания – паровой котел-утилизатор». При использовании системы прямого сжигания в топке котла много энергии сохраняется, поскольку стены топки излучают энергию обратно, и исследования показывают, что потери примерно на 20–25 % ниже.

Таблица 5

Расчетный годовой расход
Estimated annual consumption

Вариант системы	Мощность горелки, МВт	Мощность котла, МВт	Паро-производительность, т/ч	Дополнительный расход природного газа, нм ³ /ч, для достижения паропроизводительности 30 т/ч	Годовой расход дополнительного природного газа, нм ³ (8500 ч работы)
Котел прямого сжигания	25,4	25,4	30	0	0
Предтопка + утилизатор	25,4	24,1	24	650	5525000

Из табл. 5 видно, что когда горелка работает при максимальной нагрузке, она выдает 25,4 МВт. Для котла с прямым сжиганием в топке котла коэффициент полезного действия составляет ~(91–95) %, а для котлов с рекуперацией теплоты (система «предварительная камера сгорания + котел-утилизатор») около 75 %.

Из-за потерь энергии для достижения проектной производительности по пару 30 т/ч для котельной с рекуперацией теплоты (система «предвари-

тельная камера сгорания + котел-утилизатор») потребуется дополнительный расход природного газа около 650 нм³/ч, а при номинальной годовой нагрузке для производства 8500 ч в год – около 5525 000 нм³, что увеличит эксплуатационные расходы на ~1,5 млн у. е. в год (при расчетной цене природного газа ~0,27 у. е./нм³).

2. Стабильная геометрия пламени, отличная реакция на колебания нагрузки, пар высокой чистоты. Благодаря оптимальному расположению смесительных, паровых обратных, переливных, а также непрогреваемых сливных и возвратных труб достигается предварительное разделение пара перед паровым барабаном. Это приводит к отличному поведению системы при изменении нагрузки, а также к высокой чистоте пара.

3. Ускоренный пуск системы. Котлам с прямым сжиганием топлива в топке котла требуется очень мало времени для перехода от пуска к достижению максимальной производительности по пару, в то время как система с предварительной камерой сгорания должна сначала разогреть камеру сгорания до рабочей температуры, а затем – достаточно медленно – поверхности нагрева котла-утилизатора. В результате для выхода на полную нагрузку понадобится значительно большее время.

4. Простой и быстрый монтаж системы. Котлы с прямым сжиганием смеси топлив в топке предварительно собираются и испытываются на заводе-изготовителе, а затем делается очень ограниченное число разрезов для упрощения транспортировки котла. После доставки потребуются не очень большие монтажные работы непосредственно на рабочей площадке. Это означает, что работа будет выполнена за гораздо меньшее время.

5. Меньшие размеры рабочей площадки. Для установки котла с прямым сжиганием смеси топлив в топке требуется значительно меньшее пространство, тогда как альтернативной системе («предварительная камера сгорания + котел-утилизатор») требуется почти такая же площадь для камеры сгорания плюс дополнительное пространство для котла-утилизатора, который вследствие меньшей эффективности (отсутствия радиационной составляющей теплоотдачи) будет значительно больше. Предварительные расчеты для этого варианта показывают общее увеличение рабочего пространства практически в два раза.

Продукты сгорания, их отложения и способы борьбы с ними

При сжигании смеси топлив остается негорючая часть (например, зола), а также «липкая» часть, образующаяся из-за применяемой в настоящее время системы сжигания, которая не работает оптимально. При качественном распылении, оптимизированной технологии сжигания, конструкции горелочного устройства и современной системе управления будет уничтожено 99,99 % органики, и «липкая» часть будет практически полностью сожжена. Разработанная современная технология ультразвукового распыления высоковязких топлив гарантирует практически полное сгорание этого липкого ингредиента в дымовых газах. На данный момент на многих предприятиях работает устаревшая система, и, конечно же, сгорание отдельных компонентов топлива (особенно органики) не очень хорошее, вследствие чего на поверхностях нагрева и других поверхностях, где проходят дымовые газы, возможно отложение этого липкого вещества (продуктов недожога органических соединений).

В составе дымовых газов, конечно же, будут присутствовать твердый несгораемый остаток – зола [2] и инертная часть, но она будет откладываться в предварительной камере сгорания точно так же, как и в первой части предлагаемого котла с прямым сжиганием в топке. Когда зола соберется в определенном количестве, потребуется очистить предварительную камеру сгорания и в меньшей степени котел-утилизатор или топку котла прямого сжигания топлива (только в нижней части первого прохода). Очистка топки котла прямого сжигания происходит быстрее (быстрее остывает и нагревается). Часть золы попадет на трубные решетки в обоих случаях. Воздуходувку для продувки золы для топки котла прямого сжигания установить легко, ее установка для продувки двухагрегатной системы («предварительная камера сгорания + котел-утилизатор») сложнее.

Таким образом, использование предварительной камеры сгорания не дает никаких преимуществ также и с точки зрения образования нежелательных ингредиентов в продуктах сгорания и методах очистки от них.

ВЫВОДЫ

1. Предложена система ввода данных химико-физических свойств и параметров различных видов газообразных и жидких промышленных отходов для CFD-моделирования процессов горения непосредственно в топке котла.

2. Спроектировано сложное мультитопливное горелочное устройство, позволяющее комплексно сжигать до 12 видов разных газообразных и жидких сред с их эффективным мелкодисперсным распылением.

3. Разработаны пакеты программ CFD-моделирования для исследования процессов горения системы «мультитопливная горелка + камера сгорания».

4. Проведено исследование процессов горения моно- и мультисред с определением лучистого и конвективного теплообмена на стенки топок.

5. Проанализированы условия оптимального соотношения первичного и вторичного воздуха для определенной модели вертикального водотрубного котла и мультитопливной горелки.

6. Определены преимущества систем прямого сжигания в топке котла в сравнении с системой, имеющей первичное сгорание топлив в предварительной камере сгорания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 1 / Ю. П. Ярмольчик [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 3. С. 236–252. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-236-252>.
2. Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 2 / Ю. П. Ярмольчик [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-524-538>.
3. Пажи, Д. Г. Распыливающие устройства в химической промышленности / Д. Г. Пажи, А. А. Корягин, Э. А. Ламм. М.: Химия, 1975. 199 с.
4. Есьман, Р. И. Анализ процессов горения в турбулентных смешивающихся осевых и тангенциальных потоках / Р. И. Есьман, Ю. П. Ярмольчик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2009. № 2. С. 47–52.
5. Гартмана генератор // Большая советская энциклопедия: в 30 т / гл. ред. А. М. Прохоров. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1971. Т. 6. С. 391.
6. Acam Engineering [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.acam-engineering.at>. Date of access: 15.11.2023.

7. Ярмольчик, Ю. П. Механизмы образования и методика расчета выбросов загрязняющих веществ при сжигании природного газа в зависимости от эмиссионного класса горелок / Ю. П. Ярмольчик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 6. С. 565–582. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-565-582>.
8. Гламаздин, П. М. Экологические аспекты модернизации водогрейных котлов большой мощности / П. М. Гламаздин, Д. П. Гламаздин, Ю. П. Ярмольчик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 3. С. 249–259. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-3-249-259>.
9. Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности: ЭкоНП 17.01.06-001–2017. Минск: Минприроды, 2017. 139 с.
10. The John Zink Hamworthy Combustion Handbook. Vol. Fundamentals / ed. by Ch. E. Baukal, Jr. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2013. <https://doi.org/10.1201/b1297>.
11. Jones, W. P. Global reaction schemes for hydrocarbon combustion / W. P. Jones, R. P. Lindstedt // Combustion and Flame. 1988. Vol. 73, Issue 3. P. 233–249. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(88\)90021-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(88)90021-1).
12. Modest, M. F. Radiative Heat Transfer / M. F. Modest. 3rd ed. Boston: Academic Press, 2013. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-65874-3>.

Поступила 17.10.2023 Подписана в печать 19.12.2023 Опубликовано онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Haberfelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V. (2020) Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 236–252. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-236-252> (in Russian).
2. Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Haberfelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V. (2020) Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 526–540. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-526-540> (in Russian).
3. Pazhi D. G., Koryagin A. A., Lamm E. A. (1975) *Spraying Devices in the Chemical Industry*. Moscow, Khimiya Publ. 199 (in Russian).
4. Essmann R. I., Yarmolchick Y. P. (2009) Analysis of Burning Processes in Turbulent Mixing Axial and Tangential Flows. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 47–52 (in Russian).
5. Hartmann Generator. *The Great Soviet Encyclopedia. Vol. 6*. 3rd ed. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1971, 391.
6. *Acam Engineering*. Available at: <https://www.acam-engineering.at/> (accessed 15 November 2023).
7. Yarmolchick Y. P. (2019) Formation Mechanisms and Methods for Calculating Pollutant Emissions from Natural Gas Combustion Depending on the Burner Emission Class. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (6), 565–582. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-565-582> (in Russian).
8. Glamazdin P. M., Glamazdin D. P., Yarmolchick Yu. P. (2016) Environmental Aspects of Modernization of High Power Water-Heating Boilers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (3), 249–259. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-3-249-259> (in Russian).
9. Environmental Norms and Rules 17.01.06-001-2017. *Environmental Protection and Environmental Management. Environmental Safety Requirements*. The Official Publication. Minsk, Ministry of Natural Resources, 2017. 139 (in Russian).
10. Baukal Ch. E., Jr. (ed.) (2013) *The John Zink Hamworthy Combustion Handbook. Vol. 1: Fundamentals*. 2nd ed. Boca Raton, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b12975>.
11. Jones W. P., Lindstedt R. P. (1988) Global reaction schemes for hydrocarbon combustion. *Combustion and Flame*, 73 (3), 233–249. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(88\)90021-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(88)90021-1).
12. Modest M. F. (2013) *Radiative Heat Transfer*. 3rd ed. Boston, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-65874-3>.

Received: 17 October 2023 Accepted: 19 December 2023 Published online: 31 January 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-66-77>

УДК 697.32(083.74)

Определение максимальной пропускной способности регулирующего клапана в системах теплоснабжения

А. Б. Сухоцкий^{1), 2)}

¹⁾Белорусский государственный технологический университет
(Минск, Республика Беларусь),

²⁾Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Обеспечение потребителей теплотой необходимого качества в нужном количестве достаточно сложная задача. Это обусловлено различными законами изменения во времени тепловых нагрузок жилых, общественных и промышленных зданий, большой инерционностью систем централизованного теплоснабжения. В настоящее время появились новые технические возможности, позволяющие реализовывать в системах теплоснабжения способы количественного и качественного регулирования тепловой нагрузки, которые обладают целым рядом преимуществ перед качественным регулированием. В статье на основе уравнений теплопередачи, теплового и гидравлического баланса показано взаимодействие между параметрами различных типов систем теплоснабжения: степени открытия клапана, пропускной способности, расхода потока, температуры теплоносителя. Определен вид пропускных характеристик регулирующего клапана, температурных характеристик систем теплоснабжения, характеристик регулирования температуры, тепловых и гидравлических характеристик регулируемого участка. Целью статьи являлось рассмотрение влияния значения максимальной пропускной способности регулирующего клапана на теплогидравлические характеристики зависимых и независимых систем водяного отопления. В результате анализа теплогидравлических характеристик систем отопления разработаны рекомендации по подбору параметров клапана для обеспечения качественного регулирования температуры. Для независимых систем теплоснабжения с теплообменником рекомендуется устанавливать регулирующий клапан с вогнутой (логарифмической, параболической или другой) характеристикой. В случае установки клапана с линейной характеристикой необходимо, чтобы пропускная способность теплообменника была больше максимальной пропускной способности клапана (потери давления потока среды в открытом клапане были выше потерь давления в теплообменнике). Для зависимых систем теплоснабжения рекомендуется устанавливать регулирующий клапан с линейной характеристикой и максимальной пропускной способностью, в пять раз меньшей пропускной способности перемычки.

Ключевые слова: тепловой пункт, зависимая и независимая система отопления, система горячего водоснабжения, регулятор температуры, регулирование тепловых потоков, теплогидравлическая характеристика, расходная характеристика, коэффициент смешения

Для цитирования: Сухоцкий, А. Б. Определение максимальной пропускной способности регулирующего клапана в системах теплоснабжения / А. Б. Сухоцкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 1. С. 66–77. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-66-77>

Адрес для переписки

Сухоцкий Альберт Борисович
Белорусский государственный технологический университет
ул. Свердлова, 13а,
220006, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 327-87-30
alk2905@mail.ru

Address for correspondence

Sukhotski Al'bert B.
Belarusian State Technological University
13a, Sverdlova str.,
220006, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 327-87-30
alk2905@mail.ru

Determining of the Maximum Throughput of Control Valve in Heat Supply Systems

A. B. Sukhotski^{1), 2)}

¹⁾Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Abstract. Providing consumers with heat of the required quality in the required quantity is quite a tall order. This is due to various laws of time variation in thermal loads of residential, public and industrial buildings, and the high inertia of district heating systems. Currently, new technical capabilities have appeared that make it possible to implement methods of quantitative and qualitative regulation of heat load in heat supply systems, which have a number of advantages over qualitative regulation. Based on the equations of heat transfer, thermal and hydraulic balance, the article shows the interactions between the parameters of various types of heat supply systems, viz. valve opening degree, throughput capacity, flow rate, and coolant temperature. The type of flow characteristics of the control valve, temperature characteristics of heat supply systems, temperature control characteristics, thermal and hydraulic characteristics of the regulated area are determined. The purpose of the article was to consider the influence of the maximum throughput capacity of the control valve on the thermal and hydraulic characteristics of dependent and independent water heating systems. As a result of the analysis of the thermal and hydraulic characteristics of heating systems, recommendations have been developed for selecting valve parameters to ensure high-quality temperature control. For independent heat supply systems with a heat exchanger, it is recommended to install a control valve with a concave (logarithmic, parabolic or other) characteristic. In the case of installing a valve with a linear characteristic, the heat exchanger throughput capacity need to be greater than the maximum throughput capacity of valve (the pressure loss of the medium flow in open valve is higher than the pressure loss in the heat exchanger). For dependent heat supply systems, it is recommended to install a control valve with a linear characteristic and a maximum throughput capacity five times less than the throughput capacity of the jumper.

Key words: heating unit, dependent and independent heat supply system, hot water supply system, temperature controller, heat flow regulation, thermal and hydraulic characteristic, flow characteristic, mixing coefficient

For citation: Sukhotski A. B. (2024) Determining of the Maximum Throughput of Control Valve in Heat Supply Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (1), 66–77. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-66-77> (in Russian)

Введение

В конце XX в. в странах СНГ стали активно перенимать европейский опыт проектирования инженерных систем теплоснабжения как внутри, так и снаружи зданий. Конструкции тепловых пунктов претерпели значительные изменения за счет широкого применения автоматического оборудования, предназначенного для обеспечения теплового комфорта потребителя при минимальных эксплуатационных затратах [1–3].

В то же время отсутствие учебно-методических материалов, в полной мере поясняющих специфику работы новых систем теплоснабжения во всех режимах эксплуатации, порой приводит к ошибкам в принимаемых технических решениях и просчетам при выборе новых устройств, что создает негативное отношение к производителю оборудования и дискредитирует идею целесообразности применения современных технологий.

И хотя автоматическое оборудование в подавляющем большинстве случаев защищает потребителя от всевозможных недоработок в методиках расчета, монтаже и наладке, все же для принятия проектировщиком наиболее эффективного решения требуется его комплексное понимание взаимодействия между всеми элементами системы теплоснабжения.

Значительный вклад в продвижение новых технологий внесли компании «Данфосс» (Дания) [1, 4–7] и «Герц» (Австрия) [8–9], которые представили научные публикации и учебно-методическую литературу по особенностям проектирования современных систем теплоснабжения, отвечающих требованиям по обеспечению комфортных условий жизни и деятельности человека, экономии и учета энергоресурсов. Разработаны также рекомендации специалистами белорусских компаний – производителей оборудования для тепловых пунктов [10–12]. Однако у большинства проектировщиков до сих пор не сложилась целостная картина восприятия инженерных систем теплоснабжения. Особые сложности у них вызывает разработка автоматизированной зависимой системы отопления, которая практически не применяется в современных европейских тепловых пунктах и поэтому по ней нет в достаточном количестве рекомендаций. Одним из основных компонентов управления, определяющим жизнеспособность и экономичность системы теплоснабжения, является регулирующийся клапан.

Цель статьи – рассмотрение влияния значения максимальной пропускной способности регулирующего клапана на теплогидравлические характеристики зависимых и независимых систем водяного отопления.

Основная часть

Основным гидравлическим параметром регулирующего клапана является пропускная способность k_v , $(\text{м}^3/\text{ч})/\text{бар}^{0.5}$:

$$k_v = G_v / \sqrt{\Delta p} . \quad (1)$$

В инженерной практике пропускную способность определяют как значение объемного расхода воды G_v , $\text{м}^3/\text{ч}$, с плотностью $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$, проходящей через арматуру при перепаде давления на ней $\Delta p = 10^5 \text{ Па}$ ($1 \text{ кгс}/\text{см}^2$). Максимальная пропускная способность k_{vs} достигается при полном открытии клапана.

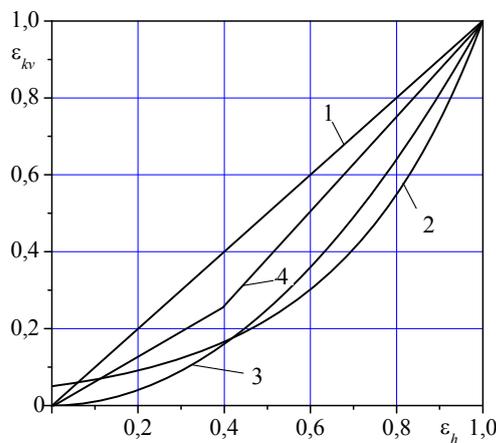
Пропускная характеристика клапана – зависимость между относительной пропускной способностью $\varepsilon_{kv} = k_v / k_{vs}$ и относительным перемещением затвора клапана $\varepsilon_h = h/h_{100}$. Клапаны конструируют по законам идеальных пропускных характеристик (рис. 1), каждому виду которых соответствует определенная форма затвора клапана.

Идеальная линейная пропускная характеристика обеспечивает пропорциональную зависимость между пропускной способностью клапана k_v и перемещением плунжера h в пределах хода регулирования и, как правило, проходит через начало координат

$$\varepsilon_{kv} = \varepsilon_h . \quad (2)$$

Рис. 1. Типы идеальных пропускных характеристик: 1 – линейная; 2 – логарифмическая; 3 – параболическая; 4 – линейно-линейная

Fig. 1. Types of ideal throughput characteristics: 1 – linear, 2 – logarithmic, 3 – parabolic, 4 – linearly linear



При идеальной логарифмической (равнопроцентной) характеристике перемещение затвора клапана на одинаковую величину из любого начального положения обеспечивает постоянство доли изменения пропускной способности теплоносителя относительно начального значения

$$\varepsilon_{kv} = \varepsilon_{kv_0}^{(1-\varepsilon_h)}, \quad (3)$$

где ε_{kv_0} – относительная пропускная способность клапана при нахождении затвора в крайнем нижнем положении $\varepsilon_h = 0$.

Как видно, идеальная логарифмическая характеристика не предполагает, что при полностью опущенном затворе клапан будет перекрыт.

Промежуточной между идеальными линейной и логарифмической характеристиками является идеальная параболическая характеристика

$$\varepsilon_{kv} = \varepsilon_h^2. \quad (4)$$

Также применяют комбинированные характеристики, к которым относят, например, линейно-линейную, получаемую при сочетании линейных профилей затворов. В системах теплоснабжения наибольшее распространение получили клапаны с линейной характеристикой.

В системах теплоснабжения регулирование температуры теплоносителя преимущественно осуществляется либо в зависимых схемах за счет теплообмена между греющим и нагреваемым теплоносителем непосредственным контактом (смешением) (рис. 2b), либо в независимых схемах – через стенку в теплообменнике 3 (рис. 2a). В обоих способах задача регулирующего клапана (регулятора температуры) 1 заключается в изменении расхода греющего теплоносителя G_1 путем изменения площади проходного сечения таким образом, чтобы обеспечить заданную температуру t нагреваемого теплоносителя с расходом G .

Для качественного регулирования следует обеспечить адекватную реакцию регулирующего клапана на изменение регулируемого параметра. Следовательно, для обеспечения качественного регулирования процесса

клапаном с линейной пропускной характеристикой зависимость относительной температуры теплоносителя ε_t от пропускной способности клапана ε_{kv} (рис. 3а) должна также иметь линейный вид.

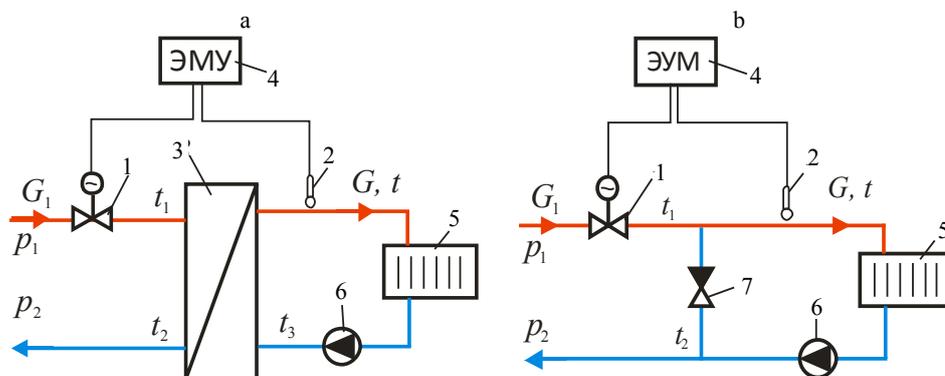


Рис. 2. Регулирование температуры теплоносителя: а – смешением; б – с помощью теплообменника; 1 – регулирующий клапан, 2 – датчик температуры, 3 – теплообменник, 4 – электронный модуль управления, 5 – система отопления, 6 – циркуляционный насос, 7 – обратный клапан

Fig. 2. Regulation of the coolant temperature by mixing (a) and using heat exchanger (b); 1 – control valve, 2 – temperature sensor, 3 – heat exchanger, 4 – electronic control module, 5 – heating system, 6 – circulation pump, 7 – check valve

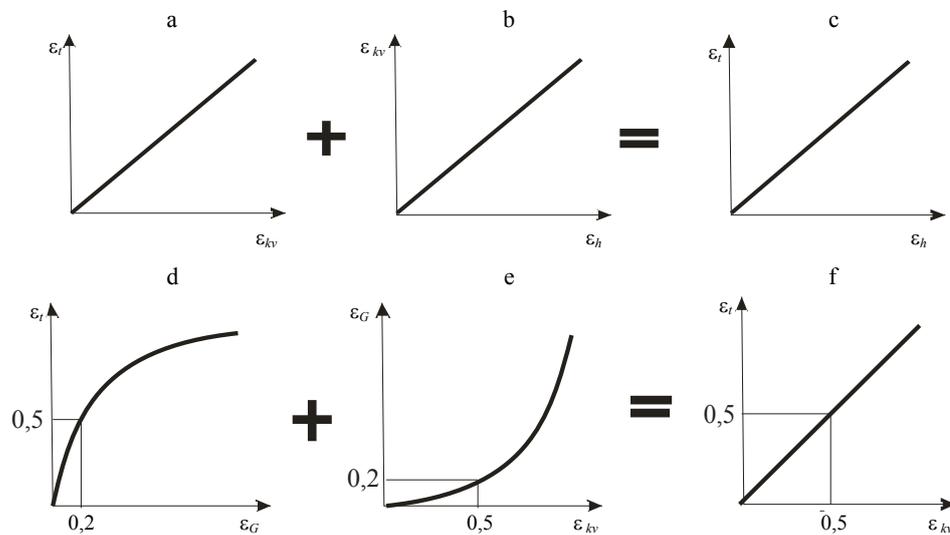


Рис. 3. Регулирование температуры теплоносителя: а, ф – температурная характеристика системы теплоснабжения; б – пропускная характеристика регулирующего клапана; с – характеристика регулирования температуры; д – тепловая характеристика регулируемого участка; е – гидравлическая характеристика регулируемого участка

Fig. 3. Coolant temperature regulation: а, f – temperature characteristic of the heat supply system; б – flow characteristic of the control valve; с – temperature control characteristic; д – thermal characteristic of the regulated section; е – hydraulic characteristic of the regulated section

Итоговый график идеального регулирования температуры теплоносителя представлен на рис. 3с, на котором показана зависимость относительной температуры теплоносителя ε_t , подаваемого в систему теплоснабжения, от степени открытия регулирующего клапана ε_h с линейной пропускной характеристикой.

Зависимость $\varepsilon_{kv} = f(\varepsilon_h)$ определяется конструкцией клапана, а зависимость $\varepsilon_t = f(\varepsilon_{kv})$ – параметрами системы теплоснабжения.

Расходная характеристика арматуры – зависимость между относительным расходом через клапан $\varepsilon_G = G / G_s$ и относительным перемещением затвора клапана $\varepsilon_h = h/h_{100}$. Расход через клапан определяется не только степенью открытия затвора клапана k_v , но и перепадом давления Δp на клапане (1). Если перепад давления на клапане постоянен $\Delta p = \text{const}$, то пропускная и расходная характеристики идентичны $\varepsilon_{kv} = k_v / k_{vs} = \varepsilon_G = G / G_s$ (1). Перепад давления на клапане может быть постоянен только в том случае, если клапан является единственным устройством регулируемого участка. В реальных условиях это встречается редко. Некоторым приближением является водоразборный кран системы водоснабжения, установленный сразу после насоса, либо регулирующий клапан с автоматическим поддержанием перепада давления на нем.

Зависимость $\varepsilon_t = f(\varepsilon_{kv})$ можно представить в виде суммы зависимостей относительной температуры от относительного расхода через клапан $\varepsilon_t = f(\varepsilon_G)$ и относительного расхода через клапан от относительной степени открытия клапана $\varepsilon_G = f(\varepsilon_{kv})$ (рис. 3d, e, f).

При этом для получения линейной характеристики $\varepsilon_t = f(\varepsilon_{kv})$ тепловая характеристика теплообмена сред $\varepsilon_t = f(\varepsilon_G)$ (рис. 3d) должна быть зеркальным отображением гидравлической характеристики регулируемого участка $\varepsilon_G = f(\varepsilon_{kv})$ (рис. 3е). Вид гидравлической характеристики $\varepsilon_G = f(\varepsilon_{kv})$ определяется в том числе значением максимальной пропускной способности k_{vs} клапана.

Расчет системы теплоснабжения

Для независимых систем теплоснабжения с теплообменником (рис. 2а) взаимосвязь между температурой и расходом $\varepsilon_t = f(\varepsilon_G)$ определяется из уравнения теплопередачи теплообменника

$$Q = k \Delta \bar{t}_a F, \quad (5)$$

где Q – теплопроизводительность теплообменника, кВт; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); $\Delta \bar{t}_a$ – среднелогарифмический по поверхности теплообменника температурный напор, К; F – площадь поверхности теплообмена, м².

Для определения необходимых соотношений расходов теплоносителей в каналах, обеспечивающих требуемые температуры на выходе из теплообменника, используют уравнение теплового баланса

$$Q = G_1 c (t_1 - t_2) = G c (t - t_3), \quad (6)$$

где t_2 – температура греющего теплоносителя на выходе из теплообменника, °С; t_3 – то же нагреваемого теплоносителя на входе в теплообменник, °С.

Среднегеометрический по поверхности теплообменника температурный напор

$$\Delta \bar{t}_a = \frac{(t_1 - t) - (t_2 - t_3)}{\ln \frac{t_1 - t}{t_2 - t_3}}. \quad (7)$$

При $(t_1 - t) = (t_2 - t_3)$

$$\Delta \bar{t}_a = t_1 - t. \quad (8)$$

После преобразования уравнений (5)–(7) получим выражение, определяющее связь между расходом теплоносителя G_1 и температурой t теплоносителя, подаваемого в систему теплоснабжения:

$$t = t_3 + (t_1 - t_3) \frac{G_1 (A - 1)}{AG - G_1}, \quad (9)$$

где $A = \exp \left(kF \left(\frac{1}{c_1 G_1} - \frac{1}{cG} \right) \right)$.

Тогда относительная характеристика системы теплоснабжения

$$\frac{t - t_3}{t_1 - t_3} = \frac{G_1 (A - 1)}{AG - G_1}, \quad (10)$$

а при $G_1 = G$ имеем $(t_1 - t) = (t_2 - t_3)$ и получим

$$\frac{t - t_3}{t_1 - t_3} = \left(\frac{cG_1}{kF} + 1 \right)^{-1}, \quad (11)$$

Выражение для определения относительного изменения температуры теплоносителя имеет вид

$$\varepsilon_t = \frac{t - t_3}{t^{\max} - t_3} = \frac{G_1 (A - 1)}{AG - G_1} \cdot \frac{A_s G - G_{1s}}{G_{1s} (A_s - 1)} = \frac{\varepsilon_G (A - 1)}{AG / G_{1s} - \varepsilon_G} \cdot \frac{A_s G / G_{1s} - 1}{(A_s - 1)}, \quad (12)$$

а при $G_1 = G$

$$\varepsilon_t = \frac{t - t_3}{t^{\max} - t_3} = \frac{cG_{1s} + kF}{cG_1 + kF}. \quad (13)$$

Как видно из (12) и (13), параметры теплообменника (коэффициент теплопередачи и площадь теплообмена) оказывают существенное влияние на вид тепловой характеристики $\varepsilon_t = f(\varepsilon_G)$, которая всегда имеет выгнутый вверх (выпуклый) вид и зависит от эффективности теплообменника, значения расходов теплоносителей.

Результаты расчетов пластинчатого теплообменника ET-012-58/58 (площадь теплообменной поверхности 14,31 м², тепловая мощность 0,5 Гкал/ч) в виде зависимостей относительного повышения температуры теплоносителя в теплообменнике от относительного расхода греющего теплоносителя представлены на рис. 4.

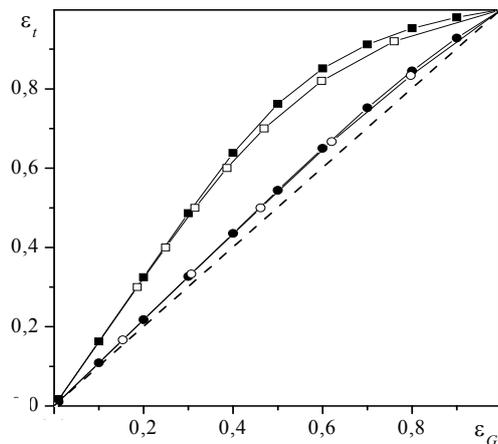


Рис. 4. Тепловая характеристика пластинчатого теплообменника ET-012-58/58

Fig. 4. Thermal characteristic of plate heat exchanger ET-012-58/58

Расчеты сделаны для двух тепловых режимов с номинальными параметрами: температуры теплоносителей 60/30 и 5/55°C, расходы теплоносителей $G_1 = 4,15$ и $G = 2,793$ кг/с (значки в виде квадратиков); температуры теплоносителей 110/70 и 65/95°C, расходы теплоносителей $G_1 = 3,459$ кг/с и $G = 4,742$ кг/с (значки в виде кружочков). Расчеты данных режимов произведены с помощью программы ГК «Теплосила» (темные значки) и по формуле (12) (светлые значки). Как видно, результаты расчетов по программе и формуле имеют качественное совпадение, что говорит о достоверности формулы и возможности ее использования для анализа качественного регулирования теплоснабжения по независимой схеме.

Чем больше мощность теплообменника по сравнению с номинальной тепловой нагрузкой системы и чем больше расход в системе отопления G по сравнению с расходом сетевой воды G_1 , тем ближе характеристика $\varepsilon_t = f(\varepsilon_G)$ к линейной [4, 5].

Взаимосвязь между расходом и пропускной способностью клапана $\varepsilon_G = f(\varepsilon_{kv})$ определяется из уравнения гидравлического баланса участка регулирования (рис. 2а)

$$\Delta p = G_1^2 / k_v^2 + G_1^2 / k_t^2 = \text{const}, \quad (14)$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$ – перепад давления на участке регулирования (рис. 2), который должен поддерживаться постоянным регулятором перепада давления; k_t – пропускная способность теплообменника по потоку сетевой воды.

При рассмотрении рабочего и максимального режимов работы системы теплоснабжения

$$G_1^2/k_v^2 + G_1^2/k_T^2 = G_{1s}^2/k_{vs}^2 + G_{1s}^2/k_T^2. \quad (15)$$

Откуда

$$\varepsilon_G = \frac{G_1}{G_{1s}} = \sqrt{\frac{1/k_{vs}^2 + 1/k_T^2}{1/k_v^2 + 1/k_T^2}} = \varepsilon_{kv} \sqrt{\frac{1 + k_T^2/k_{vs}^2}{\varepsilon_{kv}^2 + k_T^2/k_{vs}^2}}. \quad (16)$$

На рис. 5а представлены зависимости относительного расхода ε_G от относительной пропускной способности клапана ε_{kv} при различных соотношения пропускной способности теплообменника k_T к максимальной пропускной способности клапана k_{vs} . Как видно, эта характеристика также всегда имеет выгнутый вверх вид и соответственно она не может компенсировать нелинейность характеристики $\varepsilon_t = f(\varepsilon_G)$. Однако чем больше соотношения k_T/k_{vs} , т. е. чем больше гидравлическое сопротивление полностью открытого клапана по сравнению с гидравлическим сопротивлением теплообменника, тем более вид характеристики стремится к линейному. Для компенсации нелинейности обобщенной характеристики $\varepsilon_t = f(\varepsilon_G)$ в независимых системах отопления рекомендуется устанавливать регулирующийся клапан с вогнутой вниз (логарифмической, параболической или другой) характеристикой.

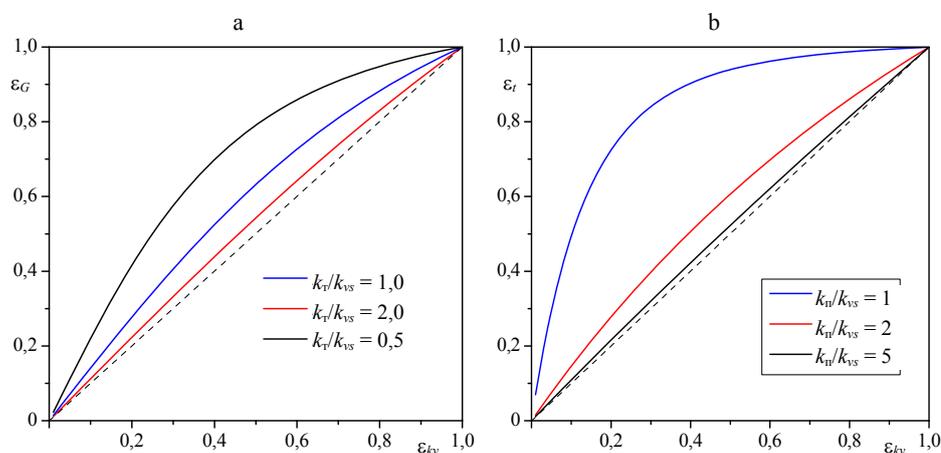


Рис. 5. а – гидравлические характеристики регулируемого участка независимой системы отопления при различных соотношениях пропускной способности теплообменника k_T к максимальной пропускной способности клапана k_{vs} ; б – температурные характеристики зависимой системы отопления при различных соотношениях пропускной способности перемычки k_{II} к максимальной пропускной способности клапана k_{vs}

Fig. 5. а – hydraulic characteristics of the regulated section of an independent heating system at different ratios of the heat exchanger throughput capacity k_T to the maximum valve throughput capacity k_{vs} ; б – temperature characteristics of the dependent heating system at different ratios of the jumper throughput capacity k_{II} to the maximum valve throughput capacity k_{vs}

Для системы теплоснабжения со смешением теплоносителей (рис. 3b) взаимосвязь между температурами и расходом определяется из условия равенства тепловых балансов

$$G_1 c t_1 + (G - G_1) c t_2 = G c t, \quad (17)$$

где c – теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг · °С).

Таким образом, если в системе теплоснабжения постоянный гидравлический режим ($G = \text{const}$), то между температурой теплоносителя t , подаваемого в систему теплоснабжения, и расходом воды G_1 имеется линейная связь

$$(t - t_2) / (t_1 - t_2) = G_1 / G. \quad (18)$$

А тепловая характеристика участка регулирования всегда имеет линейный вид

$$\varepsilon_t = \frac{t - t_2}{t^{\max} - t_2} = \frac{G_1}{G_{1s}} = \varepsilon_G. \quad (19)$$

Уравнение гидравлического баланса участка регулирования имеет вид

$$\Delta p = G_1^2 / k_v^2 - (G - G_1)^2 / k_n^2 = \text{const}, \quad (20)$$

где k_n – пропускная способность перемычки.

При рассмотрении рабочего и максимального режимов работы системы теплоснабжения получим выражение

$$G_1^2 / k_v^2 - (G - G_1)^2 / k_n^2 = G_{1s}^2 / k_v^2 - (G - G_{1s})^2 / k_n^2. \quad (21)$$

Тогда выражение для определения относительного изменения температуры теплоносителя примет вид

$$\varepsilon_t = \varepsilon_G = \frac{\sqrt{\frac{k_{vs}^4}{k_n^4} \cdot (u + 1)^2 + \left(1 + \frac{k_{vs}^2}{k_n^2} (2u + 1)\right) \left(\frac{1}{\varepsilon_{kv}^2} - \frac{k_{vs}^2}{k_n^2}\right)} - \frac{k_{vs}^2}{k_n^2} \cdot (u + 1)}{1 / \varepsilon_{kv}^2 - k_{vs}^2 / k_n^2}, \quad (22)$$

где $u = G / G_{1s} - 1 = (t_{1\max} - t^{\max}) / (t^{\max} - t_{2\max})$ – коэффициент смешения.

Рассмотрим зависимую систему отопления с температурным графиком: $t_{1\max} = 130$ °С, $t^{\max} = 90$ °С, $t_{2\max} = 70$ °С, для которой коэффициент смешения $u = 2$. На рис. 5b представлены зависимости относительной температуры ε_t от относительной пропускной способности клапана ε_{kv} при различных соотношениях пропускной способности перемычки k_n к максимальной пропускной способности клапана k_{vs} . Как видно, чем больше соотношения k_n / k_{vs} , тем более вид характеристики стремится к линейному.

ВЫВОДЫ

1. Линейное управление тепловым потоком – идеальный закон регулирования, к которому следует стремиться при проектировании систем теплоснабжения. Для обеспечения качественного регулирования систем теплоснабжения необходимо учесть комплексное взаимодействие тепло-

вой $\varepsilon_t = f(\varepsilon_G)$, гидравлической $\varepsilon_G = f(\varepsilon_{kv})$ характеристик регулируемого участка и пропускной характеристики регулирующего клапана $\varepsilon_{kv} = f(\varepsilon_h)$.

2. Для независимых систем теплоснабжения с теплообменником температурная характеристика $\varepsilon_t = f(\varepsilon_{kv})$ имеет нелинейный выпуклый вид и зависит от эффективности теплообменника, значения расходов теплоносителей. Поэтому для обеспечения качественного регулирования рекомендуется устанавливать регулирующий клапан с вогнутой (логарифмической, параболической или другой) характеристикой. При установке клапана с линейной характеристикой необходимо, чтобы пропускная способность теплообменника была больше максимальной пропускной способности клапана (потери давления потока среды в открытом клапане были выше потери давления в теплообменнике).

3. Для зависимых систем теплоснабжения температурная характеристика $\varepsilon_t = f(\varepsilon_{kv})$ имеет линейный вид. Поэтому для обеспечения качественного регулирования (отклонение не более 5 %) рекомендуется устанавливать регулирующий клапан с линейной характеристикой и максимальной пропускной способностью в пять раз меньше пропускной способности переключки.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению «Передовые цифровые технологии» СПбГМТУ № 075-15-2022-312.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пырков, В. В. Современные тепловые пункты. Автоматика и регулирование / В.В. Пырков. Киев: Такі справи, 2007. 250 с. Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/danfoss/7732>.
2. Седнин, А. В. Энергоэффективность применения гибридных тепловых пунктов в условиях интеграции электрических и тепловых сетей городских микрорайонов. Часть 1: Обоснование целесообразности применения гибридных тепловых пунктов / А. В. Седнин, М. И. Позднякова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 6. С. 552–566. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566>.
3. Седнин, А. В. О подходе к обработке данных для интеллектуальных систем централизованного теплоснабжения / А. В. Седнин, А. В. Жерело // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. С. 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.
4. Benonysson, A. Optimum control of heat exchangers [Electronic Resource] / A. Benonysson, H. Boysen. 1995. Mode of access: <https://www.yumpu.com/en/document/read/18453065/optimum-control-of-heat-exchangers-danfosscom>.
5. Benonysson, A. Valve characteristics for motorized valves in district heating substations / Atli Benonysson, H. Boysen. 1999. Mode of access: <https://www.yumpu.com/en/document/read/18452497/valve-characteristics-for-motorized-valves-in-district-danfosscom>.
6. Пырков, В. В. Гидравлическое регулирование систем отопления и охлаждения / В.В. Пырков. Киев: Такі справи, 2010. 303 с. Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/danfoss/7731>.
7. Применение средств автоматизации Danfoss в тепловых пунктах систем централизованного теплоснабжения зданий [Электронный ресурс]. М.: ООО Данфосс, 2009. Режим доступа: <http://www.danfoss.spb.ru/images/stories/pdf/RB.00.H5.50.pdf>.
8. Покотилов, В. В. Системы водяного отопления / В. В. Покотилов. Вена: HERZ Armaturen, 2008. 159 с. Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/herz/15237>.
9. Покотилов, В. В. Регулирующие клапаны автоматизированных систем тепло- и хо-

- лodosнабжения / В. В. Покотилов. Вена: HERZ Armaturen, 2017. 228 с. Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/herz/15238>.
10. Сухоцкий, А. Б. Методика подбора регулирующих клапанов TRV и регуляторов давления RDT [Электронный ресурс] / А. Б. Сухоцкий. Минск: ГК «Теплосила», 2017. Режим доступа: <https://teplo-sila.com/assets/files/proektirovshhikam/metodika-podbora/metodika-podbora.pdf>.
 11. Сухоцкий, А. Б. О правильном подборе и настройке регулирующей арматуры в тепловом пункте / А. Б. Сухоцкий // Трубопроводная арматура и оборудование. 2018. № 2 (95), С. 54–55.
 12. Сухоцкий, А. Б. Основы учета, контроля и регулирования в системах теплоснабжения / А. Б. Сухоцкий. Минск: Колорград, 2023. 299 с.
- Поступила 17.10.2023 Подписана в печать 26.12.2023 Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. Pyrkov V. V. (2007) Modern Heating Units. Automation and Regulation. Kiev, Taki Spravi Publ. 250. Available at: <https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/danfoss/7732> (in Russian).
2. Sednin A. V., Pozdnyakova M. I. (2023) Energy Efficiency of Using Hybrid Heating Points in Conditions of Integration of Electrical and Thermal Networks of Urban Neighborhoods. Part 1: Justification of the Feasibility of Using Hybrid Thermal Points. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (6), 552–566. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566> (in Russian).
3. Sednin A. V., Zherelo A. V. (2022) An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>. (in Russian).
4. Benonysson A., Boysen H. (1995) *Optimum Control of Heat Exchangers*. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/read/18453065/optimum-control-of-heat-exchangers-danfosscom>.
5. Benonysson A., Boysen H. (1999) *Valve Characteristics for Motorized Valves in District Heating Substations*. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/read/18452497/valve-characteristics-for-motorized-valves-in-district-danfosscom>.
6. Pyrkov V. V. (2010) *Hydraulic Regulation of Heating and Cooling Systems. Theory and Practice*. Kiev, Taki spravi Publ. 304. Available at: <https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/danfoss/7731> (in Russian).
7. *The Use of Danfoss Automation Tools in Heating Units of District Heating Systems of Buildings: A Manual*. Moscow, Danfoss LLC, 2009. Available at: <http://www.danfoss.spb.ru/images/stories/pdf/RB.00.H5.50.pdf> (in Russian).
8. Pokotilov V. V. (2008) *Water Heating Systems*. Vienna, HERZ Armaturen. 159. Available at: <https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/herz/15237> (in Russian).
9. Pokotilov V. V. (2017) *Control Valves of Automated Heat and Cold Supply Systems*. Vienna, HERZ Armaturen. 228. Available at: <https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/herz/15238> (in Russian).
10. Sukhotskii A. B. (2017) *Method of Selection of TRV Control Valves and Pressure Regulators RDT*. Minsk, Teplosila Group of Companies. Available at: <https://teplo-sila.com/assets/files/proektirovshhikam/metodika-podbora/metodika-podbora.pdf> (in Russian).
11. Sukhotskii A. B. (2018) On the Correct Selection and Adjustment of Control Valves in a Heating Unit. *Truboprovodnaya Armatura i Oborudovanie* [Pipe Fittings and Equipment], (2), 54–55 (in Russian).
12. Sukhotskii A. B. (2023) *Fundamentals of Accounting, Control and Regulation in Heat Supply Systems*. Minsk, Kolograd Publ. 299 (in Russian).

Received: 17 October 2023 Accepted: 26 December 2023 Published online: 31 January 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-78-91>

УДК 621.31, 004.852

Прогнозирование часов пик энергопотребления региональных энергосистем

С. Р. Сайтов¹⁾, Н. Д. Чичирова¹⁾, А. А. Филимонова¹⁾, Н. Б. Карницкий²⁾

¹⁾Казанский государственный энергетический университет (Казань, Российская Федерация),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Вторым товаром на рынках электрической энергии является электрическая мощность. Для потребителей тарифицируемый объем «генераторной» мощности определяется как среднее из часовых объемов потребления в рабочие дни в часы пиковой нагрузки в регионе. Стоимость мощности в отдельных регионах может достигать 40 % от конечного тарифа, поэтому снижение нагрузки в пиковые часы на 10 % может привести к уменьшению ежемесячных платежей на 3 %. Однако такой способ экономии для потребителя недоступен – коммерческий оператор оптового рынка электрической энергии и мощности публикует часы пиковой нагрузки регионов после 10-го числа следующего месяца, когда данная информация уже не актуальна. Своевременное прогнозирование часов пиковой нагрузки позволит, с одной стороны, снизить издержки потребителей на платежах за электрическую мощность, с другой – сгладить суточный график электрической нагрузки энергосистемы, оптимизировав тем самым работу генерирующего оборудования станций и сетей системного оператора. В статье приводится исследование эффективности методов машинного обучения в контексте прогнозирования пикового часа региональной энергосистемы. Исследование затрагивает временной период с ноября 2011-го по октябрь 2023 г., охватывает 76 регионов Российской Федерации, включая субъекты ценовых (1-й и 2-й) и неценовых зон и насчитывает 10 методов машинного обучения. Результаты исследования показали, что статистически метод кластеризации K-ближайших соседей оказывается наиболее точным, хоть и не универсальным. Высокую эффективность (с точки зрения точности и быстродействия) продемонстрировали методы опорных векторов и классификация деревьев. В ходе исследований также было опровергнуто предположение о том, что наибольшую ценность при прогнозировании пикового часа оказывают наиболее близкие, с позиции временного ряда, данные.

Ключевые слова: машинное обучение, прогнозирование, часы пиковой нагрузки, коммерческий оператор, рынки электрической энергии и мощности, оптимизация издержек

Для цитирования: Прогнозирование часов пик энергопотребления региональных энергосистем / С. Р. Сайтов [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 1. С. 78-91. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-78-91>

Адрес для переписки

Сайтов Станислав Радикович
Казанский государственный
энергетический университет
ул. Красносельская, 51,
420066, г. Казань, Российская Федерация
Тел.: +7 843 519-42-20
saapel@mail.ru

Address for correspondence

Saitov Stanislav R.
Kazan State Power
Engineering University
51, Krasnoselskaya str.,
420066, Kazan, Russian Federation
Tel.: +7 843 519-42-20
saapel@mail.ru

Forecasting Peak Hours for Energy Consumption in Regional Power Systems

S. R. Saitov¹⁾, N. D. Chichirova¹⁾, A. A. Filimonova¹⁾, N. B. Karnitsky²⁾

¹⁾Kazan State Power Engineering University (Kazan, Russian Federation),

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Electrical power is the second most important commodity in electrical energy markets. For consumers, the charged amount of “generator” power is determined as the average value of hourly consumption amounts on working days during peak hours in the region. The cost of power in some regions can reach 40 % of the final tariff, so reducing the load during peak hours by 10 % can lead to a decrease in monthly consumer payments by 3 %. However, such a way of saving money is not available to the consumer since the commercial operator of the wholesale market of electricity and capacity publishes the peak hours of the regions after the 10th day of the next month, when this information is no longer relevant. Timely forecasting of peak hours will make it possible, on the one hand, to reduce consumer costs for payments for electric power, and on the other hand, to smooth out the daily schedule of electric load of the power system, thereby optimizing the operation of generating equipment of stations and networks of the system operator. The article presents a study of the effectiveness of machine learning methods in the context of forecasting the peak hour of a regional power system. The study concerns the period from November 2011 to October 2023, covers 76 regions of the Russian Federation, including subjects of price (1st and 2nd) and non-price zones and includes 10 machine-learning methods. The results of the study showed that statistically, the K-nearest neighbors clustering method turns out to be the most accurate, although not universal. Support Vector Classifier and Decision Tree Classifier have demonstrated high efficiency (in terms of accuracy and speed). The study also refuted the assumption that the closest data in terms of time series has the greatest value in predicting peak hours.

Keywords: machine learning, forecasting, peak hours, commercial operator, electricity and capacity markets, cost optimization

For citation: Saitov S. R., Chichirova N. D., Filimonova A. A., Karnitsky N. B. (2024) Forecasting Peak Hours for Energy Consumption in Regional Power Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (1), 78–91. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-78-91> (in Russian)

Введение

Согласно постановлению Правительства Российской Федерации № 442 от 04.05.2012 (в ред. от 28.09.2023), класс потребителей, относящихся к «прочим потребителям» (все юридические лица, за исключением сетевых компаний), максимальная мощность энергопринимающих устройств которых в границах балансовой принадлежности составляет не менее 670 кВт, обязан рассчитываться с гарантирующим поставщиком за электрическую мощность как за отдельный товар.

Размер оплаты за «генераторную» мощность для потребителя в таком случае зависит от тарифов на электрическую мощность и от объемов его потребления в рабочие дни в пиковые часы нагрузки региона. Плановая разгрузка энергопотребляющих устройств в эти часы на 100 кВт способна принести ежемесячную экономию потребителю в размере 70–190 тыс. руб. (в соответствии с тарифами на мощность 2023 г. [1]). Проблема заключает-

ся в том, что пиковые часы регионов публикуются на сайте [2] администратора торговой системы (АТС) по итогу месяца, уже после даты потребления. Таким образом подобный способ оптимизации издержек для потребителя становится недоступным.

Для решения этой проблемы авторы исследования [3] предприняли попытку установить корреляционную зависимость между предшествующими и будущими часами пиковой нагрузки. Исследование проводилось для 262 энергосбытовых компаний, входящих в реестр гарантирующих поставщиков. Искомый пиковый час рассматривался как целочисленное значение, лежащее в диапазоне от 0 до 23, и описывался законом распределения дискретной случайной величины. Гипотеза авторов состояла в том, что на прогнозируемый пиковый час наибольшее влияние оказывают пиковые часы текущего дня и месяца за предыдущие годы. Точность прогноза оценивалась по соотношению совпавших планируемых и фактических пиковых часов к общему количеству рабочих дней.

Исследователи пришли к следующим выводам: 1) прогноз на основании только лишь пиковых часов текущих суток предыдущих лет дает сомнительный результат – точность прогноза по этой методике в 2021 г. в среднем по 81 региону РФ составила 39,4 %; 2) отсутствует какая-либо связь между ценовыми зонами и точностью прогноза; 3) разница в точности прогноза между ценовой (38,7 %) и неценовой (43,1 %) зонами не существенная; 4) в ряде регионов прослеживается прямая зависимость между предсказуемостью пиковых часов и сезонными условиями.

Схожий подход прогнозирования часов пиковой нагрузки с применением наивных методов описывается в работе [4]. В этом исследовании авторы затронули субъекты РФ, относящиеся к ценовым зонам (67 регионов). Период исследования: 2020–2022 гг. Были предложены и исследованы 10 наивных моделей. Точность прогноза оценивалась аналогично работе [3].

В результате исследования было установлено, что наилучший результат достигается для моделей, принимающих в качестве прогнозного значения: 1) наиболее частный пиковый час соответствующего месяца прошлого года – 43 %; 2) наиболее частный пиковый час скользящего окна в одну (44 %), две (44 %) и три (42 %) недели со смещением на год. Экономический эффект на каждый процент роста точности прогноза авторы оценили в размере $97,92 \pm 15,84$ руб./кВт·год), исходя из тарифов на электрическую мощность в регионах.

В исследовании [5] часы пик определялись косвенным методом – на основании экстремумов планируемых суточных графиков электропотребления. По замыслу авторов, точность прогнозирования пиковых часов в таком случае будет зависеть от точности прогнозирования суммарного энергопотребления в регионе.

Прогнозирование энергопотребления выполнялось для Ярославской области с помощью методов нейросетевого моделирования, в частности MLP (Multi-Layer Perceptron), LSTM (Long Short Term Memory)

и CNN (Convolutional Neural Networks). Период исследования: 2016–2021 гг. Несмотря на относительно низкую погрешность этих методов (MAPE = 3,43 %), точность прогноза часов пиковой нагрузки оказалась в пределах 27–36 %.

В этом же исследовании авторы предложили совместить свой метод с наивной моделью, описанной в работе [3] для прогнозирования двухчасового интервала вместо одночасового. В результате этого точность прогнозирования ожидаемо выросла и составила 74 %. Вместе с тем в исследовании [4] наглядно продемонстрировано, что расширение интервала прогнозирования приводит к резкому сокращению связанного экономического эффекта, а потому не имеет смысла.

Попытка установить более сложную зависимость между исходными данными и целевым признаком предпринята в работе [6]. В качестве исходных данных были рассмотрены не только календарные признаки (год, квартал, месяц, неделя, день), но и смещенные значения целевой переменной (смещение на 1 месяц и 1 год, мода по интервалу в 1 неделю и 1 месяц со смещением в 1 месяц и 1 год), астрономические (время восхода и заката, длительность светового дня, солнечный полдень и т.д.), метеорологические (температура воздуха, скорость ветра и т.п.) и энергосистемные (динамика энергопотребления на балансирующем рынке) признаки.

Исследование выполнялось для Краснодарского края с помощью методов машинного обучения (Machine Learning – ML): Decision Tree Classifier (DTC), Extra Trees Classifier (ETC), MLP Classifier (MLP) и Random Forest Classifier (RFC). Обучающая выборка включала данные за период 2014–2021 гг., тестовая – за 2023 г. Наилучший результат (62,7 %) для одночасового интервала был получен методом RFC при учете энергосистемных признаков с окном агрегирования данных 24 часа. Авторами сделан вывод, что при долгосрочном планировании значимыми оказываются лишь календарные признаки и смещенные значения целевой переменной.

О практической значимости рассматриваемой проблемы свидетельствует массовая регистрация программ для ЭВМ [7–13] российскими научными коллективами и крупными промышленными предприятиями в относительно короткий период времени – с 2021 по 2023 г.

Вместе с тем задача прогнозирования часов пиковой нагрузки не является популярной для зарубежных исследователей. Это связано со спецификой ценообразования на Российском розничном рынке электроэнергии и мощности (РРЭМ) [5].

Цель, стоящая перед авторами настоящей работы, – исследовать эффективность различных методов машинного обучения в контексте прогнозирования часов пика энергопотребления в масштабах всего РРЭМ Российской Федерации, включая ценовые (1-я и 2-я) и неценовые зоны, за более широкий временной интервал (2011–2023 гг.), с учетом ранее накопленного опыта.

Дополнительной задачей исследования также является оценка влияния гиперпараметров рассматриваемых моделей на конечный результат.

Материалы

Для исследования эффективности технологии машинного обучения была сформирована база данных (БД) пиковых часов 76 регионов Российской Федерации. Данные для БД получены из открытого источника – сайта коммерческого оператора Оптового рынка электрической энергии и мощности (ОРЭМ) [2]. Учитывая опыт работы [6] исходные данные были ограничены календарными (день, месяц, год) и целевым признаками (час). Исследуемый интервал (ноябрь 2011-го – октябрь 2023 г.) определялся временным диапазоном, доступным в источнике [2] на момент написания статьи.

Для возможности верификации моделей машинного обучения генеральная совокупность данных была разделена на две выборки: обучающую (2011–2022 гг.) и тестовую (2023 г.). Обучающая выборка для одного региона включала в себя 2654 записи, тестовая – 183.

Первичный анализ

Первичный анализ данных, выполненный на примере Ивановской области, показал, что:

- распределение пиковых часов внутри генеральной совокупности данных приближено к нормальному распределению Гаусса–Лапласа (рис. 1), что соответствует центральной предельной теореме [14];
- влияние исходных данных на целевой признак (пиковый час) распределено в следующем порядке: день (41,1 %), месяц (33,2 %) и год (25,7 %);
- отсутствует какая-либо существенная корреляционная связь между целевым признаком и исходными параметрами (табл. 1).

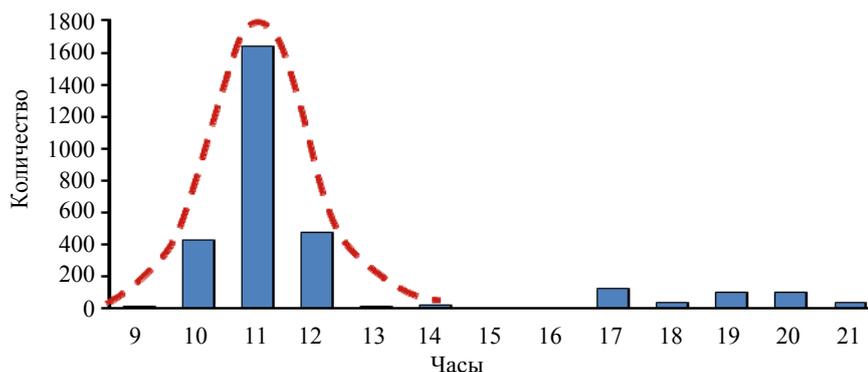


Рис. 1. Распределение часов пиковой нагрузки в генеральной совокупности данных

Fig. 1. Distribution of peak hours in the population of data

Учитывая результаты первичного анализа, структуру БД, а также характер взаимодействия исследуемых признаков (рис. 2), приходим к выводу, что перед нами типичная задача классификации.

Таблица 1

Корреляция исходных данных с целевым признаком
 Correlation of source data with target feature

Период	Год	Месяц	День	Час
Год	1	-0,042776	0,009258	-0,176807
Месяц	-0,042776	1	-0,041755	0,232005
День	0,009258	-0,041755	1	0,000965
Час	-0,176807	0,232005	0,000965	1

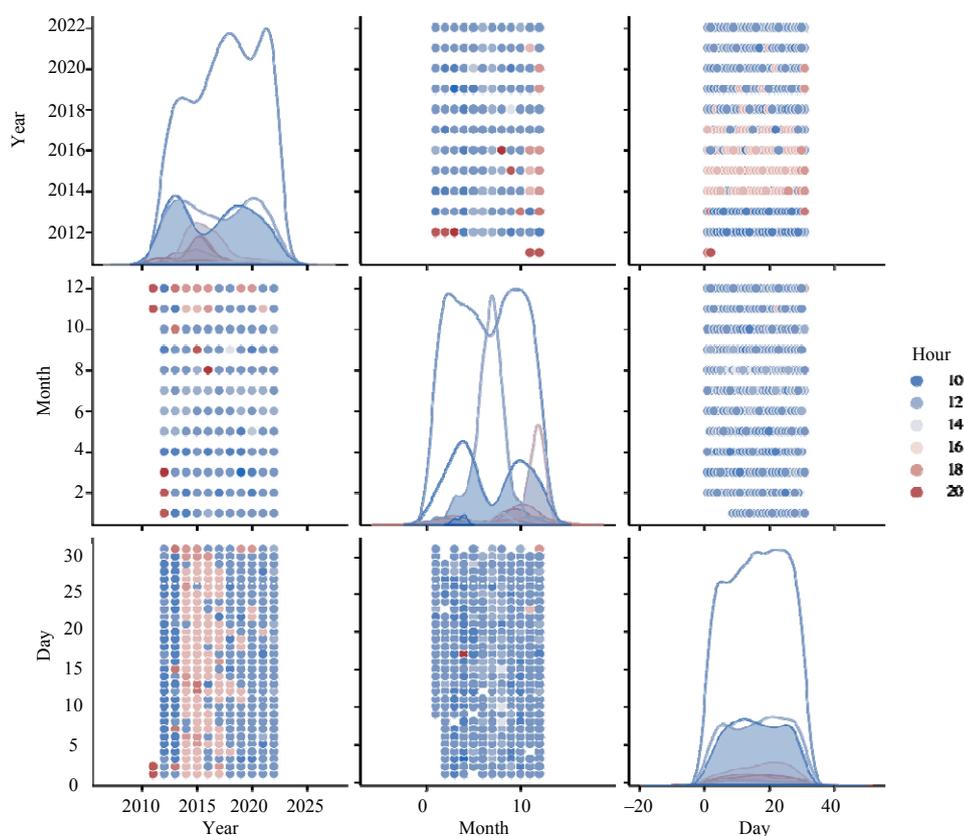


Рис. 2. Взаимосвязь исходных данных с целевым признаком

Fig. 2. Relationship between source data and target feature

Методы

Для решения задачи классификации применены следующие ML-методы:

- решающие деревья (DecisionTreeClassifier – DTC, рис. 3);
- градиентный бустинг Scikit (GradientBoostingClassifier);
- градиентный бустинг XgBoost (XGBClassifier);
- градиентный бустинг CatBoost (CatBoostClassifier);
- градиентный бустинг AdaBoost (AdaBoostClassifier);

- опорные векторы (SupportVectorClassifier – SVC);
- случайный лес (RandomForestClassifier – RFC);
- ансамбль Bagging Classifier (DTC);
- ансамбль Bagging Classifier (SVC);
- К-ближайших соседей (KNeighbors Classifier).

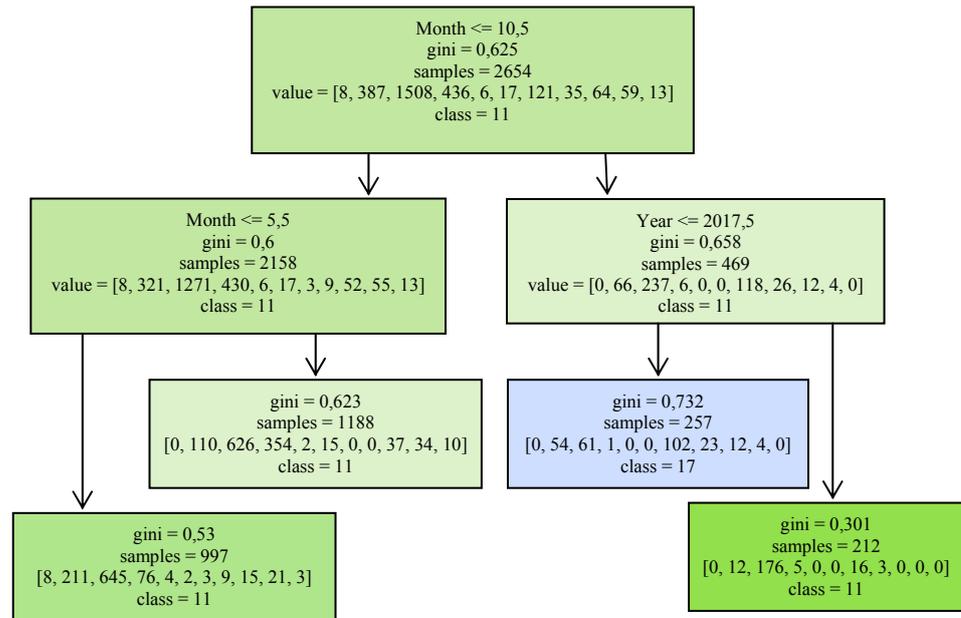


Рис. 3. Пример структуры решающего дерева

Fig. 3. Example of decision tree structure

Построение прогнозных моделей осуществлялось по схеме, изображенной на рис. 4, с помощью программы для ЭВМ [13].

Настройка оптимальных гиперпараметров ML-моделей производилась методами кросс-валидации: через рандомизированный поиск (RandomizedSearchCV) для SVC и Bagging Classifier (SVC) и с помощью сетки гиперпараметров (GridSearchCV) для остальных ML-методов. В параметрах самой кросс-валидации было задано пять разрезов данных ($n_splits = 5$).

В процессе кросс-валидации для метода SVC проводился рандомизированный поиск констант ядра γ и регуляризации C в диапазонах 0,01–100,0 и 0,01–1,0 соответственно. Среди вариантов ядра (kernel) рассматривались только линейное (rbf) и радиальное (linear) ядра, поскольку полиномиальное (poly) ядро резко снижало быстродействие алгоритма, не повышая при этом качества модели. Полученные гиперпараметры (kernel, γ , C) также передавались в метод BaggingClassifier(SVC), ускоряя работу этого алгоритма за счет исключения потребности в повторном рандомизированном поиске.

В целях минимизации объема алгоритма кросс-валидации для ML-методов DTC, RFC и Bagging(DTC) строилась сетка лишь из одного гиперпа-

параметра – «глубина дерева» (`max_depth`). В работе [15] показано, что параметр «количество деревьев» (`n_estimators`) незначительно влияет на качество модели, поэтому в сетку не включался и был оставлен по умолчанию (`default = 100`).

В методе `KNeighborsClassifier` настройка проводилась для двух гиперпараметров – типа весов (`weights`) и количество соседей (`n_neighbors`). Тип весов выбирался из однородных (`uniform`) и неоднородных (`distance`), количество соседей ступенчато варьировалось от 2 до 100.

Обучение и оценка моделей осуществлялись как при полном наборе исходных признаков, так и при частичном их отборе (рис. 4, табл. 2).

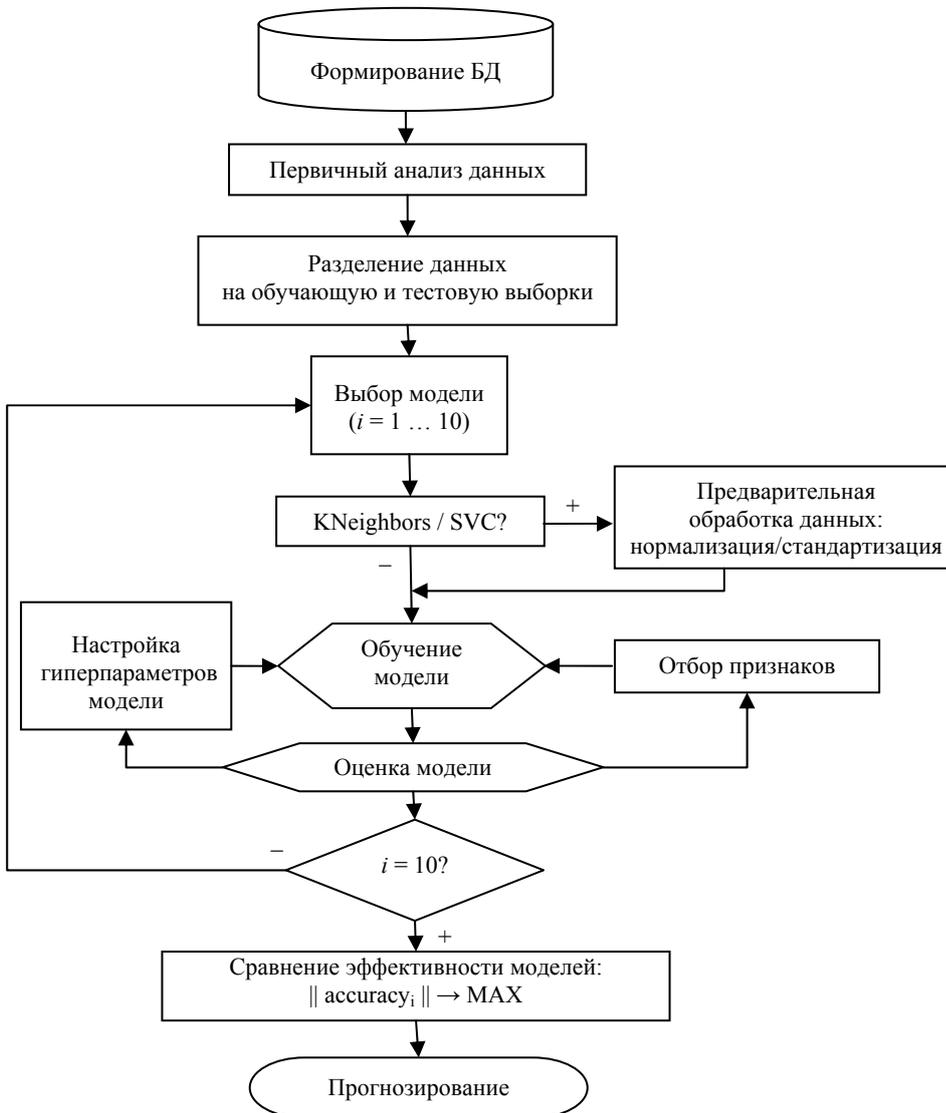


Рис. 4. Схема разработки прогнозной модели
Fig. 4. Scheme for developing a predictive model

Таблица 2

Оценка моделей на примере данных Ивановской области
Evaluation of models using data from the Ivanovo region as an example

Метод	Метрика (Точность) / Гиперпараметр (глубина)			
	Д + М + Г ¹	Д + М	Д + Г	М + Г
Naive Models [3]	–	–	62,63 %	–
DTC	67,21 %/6	63,39 %/2	63,39 %/2	63,39 %/6
Gradient boost	63,39 %	63,39 %	63,39 %	63,39 %
Xgboost	52,46 %	63,39 %	57,92 %	63,39 %
CatBoost	60,66 %	63,39 %	58,47 %	63,39 %
AdaBoost	63,39 %	57,38 %	63,39 %	63,39 %
SVC ²	71,58 %	–	–	–
RFC	63,39 %/2	63,39 %/2	63,39 %/4	63,39 %/9
Bagging(DTC)	57,92 %/4	63,39 %/4	59,02 %/18	69,95 %/3
Bagging(SVC)	59,56 %/4	63,39 %/2	61,2 %/11	71,58 %/4
KNeighbors ³	66,12 %/25	63,39 %/6	65,57 %/66	69,95 %/20

¹Д – день, М – месяц, Г – год.
²kernel = rbf, $\gamma = 0,4986865424754635$, $C = 77,06343825607371$, $r = 0,5$.
³MinMaxScaler, weights = uniform.

Предварительная обработка данных в виде стандартизации (StandardScaler) и нормализации (MinMaxScaler) оказывала какой-либо эффект на модель только для методов KNeighbors и SVC, поэтому для других ML-методов не применялась.

Так как перед авторами стояла задача мультиклассовой классификации (пример на рис. 1 – 11 уникальных классов), из всех возможных метрик качества моделей (accuracy, precision, recall, specificity, F1-мера и др.) была выбрана лишь одна – accuracy. В контексте прогноза сущность этой оценки соответствует понятию «точность» из статьи [3]. Пример такой оценки, выполненной по схеме на рис. 4, представлен в табл. 2.

Обсуждение результатов

Исследование, выполненное по схеме 4 для БД 76 регионов РФ, показало, что применение моделей, построенных на ML-методах, приводит к росту точности прогнозирования в среднем на 13,54 % (рис. 5) по сравнению с наивными моделями, описанными в работах [3, 4]. Лучший результат был получен для Кемеровской области – в этом регионе точность прогноза выросла на 29,4 %: с 41,05 до 70,45 %. Снижение точности прогноза при использовании ML-методов произошло лишь в одном регионе – Оренбургской области. Падение здесь составило 1,88 %.

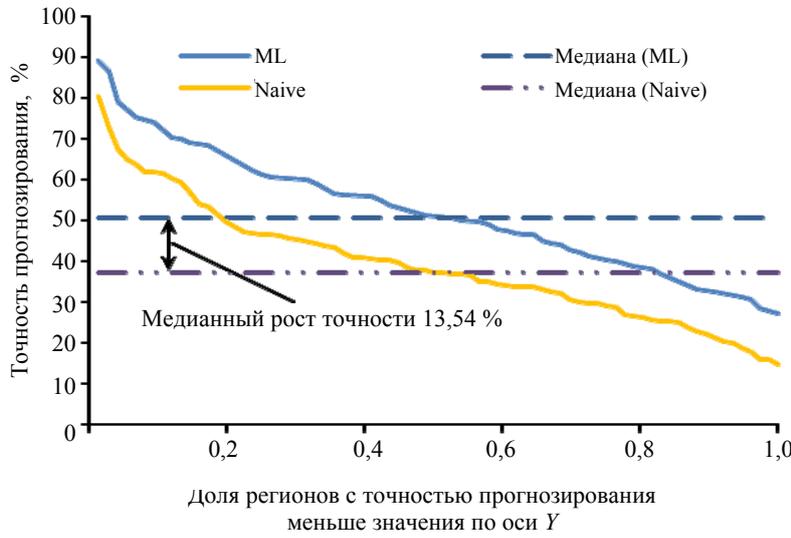


Рис. 5. Распределения точности прогноза между регионами РФ
 Fig. 5. Distribution of forecast accuracy by regions of the Russian Federation

В процессе выбора наилучших методов (рис. 6), в случае совпадения результатов, предпочтение отдавалось более быстрым (с точки зрения скорости вычислений).

Статистически KNeighbors оказывался лучшим методом прогнозирования, однако, как видно из диаграммы (рис. 6), универсальным его назвать нельзя. Наибольшей интерпретируемостью и быстродействием обладает метод DTC. Метод SVC показывал отличные результаты при оценке модели, но при этом расходовал значительное время на рандомизированный поиск гиперпараметров. Наиболее «дорогими», с точки зрения процессорного времени, и наименее эффективными (рис. 6) оказывались Bagging- и Boosting-методы. Это делает их непригодными в контексте решения нашей задачи.

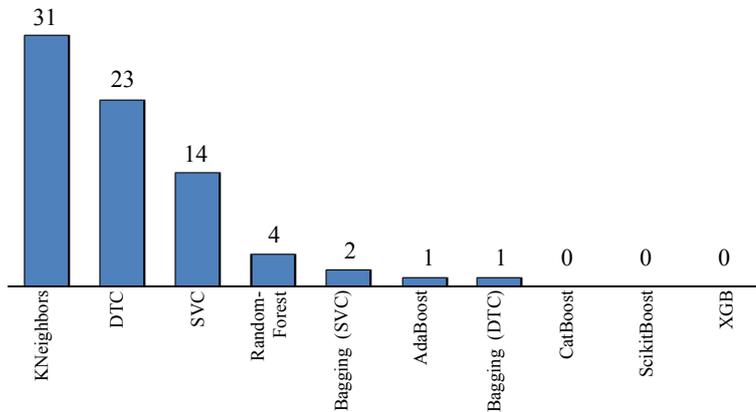


Рис. 6. Частота классификации метода как наилучшего
 Fig. 6. Distribution of best methods for peak hour estimation

Параллельно с процессом исследования эффективности ML-моделей проводилась проверка гипотезы, выдвинутой в работах [3–6], согласно которой наибольшую ценность при прогнозировании пикового часа имеют ближайшие, с позиции временного ряда, данные. Для этого фиксировался гиперпараметр *weights* метода KNeighbors, при котором последний давал наилучший результат (рис. 7).

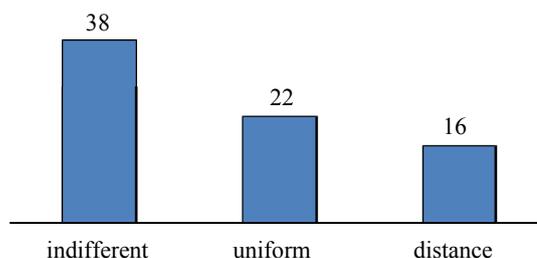


Рис. 7. Тип весов при высшей метрике метода K-ближайших соседей
Fig. 7. Type of weights at the highest metric of the K-Nearest Neighbors method

Проверка показала, что в большинстве случаев (38/76) моделям был безразличен тип весов. При этом в некоторых регионах (22/76) модель с однородными весами даже демонстрировала большую эффективность. Данное наблюдение свидетельствует о том, что ценность исходных данных не зависит от их близости к целевому признаку.

ВЫВОДЫ

1. Применение технологии машинного обучения в задачах прогнозирования часов пик энергопотребления региональных энергосистем позволяет повысить точность прогнозирования (в среднем по РРЭМ) на 13,54 % по сравнению с существующими наивными моделями.
2. Наиболее подходящими методами для решения таких задач являются KNeighbors Classifier, Decision Tree Classifier и Support Vector Classifier библиотеки Scikit Learn.
3. Близость, с позиции временного ряда, исходных данных к искомому целевому признаку в большинстве случаев не влияет на их ценность.
4. Несмотря на рост прогнозируемости моделей вследствие применения технологии машинного обучения, их средняя точность остается на уровне 51,83 %, что свидетельствует о проблемах, связанных с самой базой данных, а точнее, с ее объемом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Изучение процессов в гибридной энергетической установке «топливный элемент – газовая турбина»» (шифр проекта: FZSW-2022-0001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Составляющие предельных уровней нерегулируемых цен // АО «Администратор торговой системы» [Электронный ресурс]. 2002–2023. – Режим доступа: <https://www.atsenergo.ru/results/market/svnc>. Дата доступа: 01.11.2023.
2. Часы пиковой нагрузки // АО «Администратор торговой системы» [Электронный ресурс]. 2002–2023. – Режим доступа: <https://www.atsenergo.ru/results/market/calcfacthour>. Дата доступа: 01.11.2023.
3. Сaitov, С. Р. Прогнозирование пиковых часов энергосбытовых компаний, входящих в реестр гарантирующих поставщиков АО «АТС» / С. Р. Сaitov, Б. Р. Карачурин, М. В. Сидоров // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14, № 4 (56). С. 59–68.
4. Воронин, В. А. Прогнозирование часов пиковой нагрузки региональных энергосистем с использованием наивных моделей / В. А. Воронин, Ф. С. Непша // Интеллектуальная электротехника. 2023. № 3 (23). С. 111–124. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_3_111.
5. Марьясин, О. Ю. Прогнозирование рыночных цен на электроэнергию и часов пиковой нагрузки для региона Российской Федерации / О. Ю. Марьясин, А. И. Лукашов, Н. А. Смирнов // Управление большими системами. 2022. Вып. 99. С. 81–113. <https://doi.org/10.25728/ubs.2022.99.4>
6. Воронин, В. А. Прогнозирование часов пиковой нагрузки региональной энергосистемы с использованием методов машинного обучения / В. А. Воронин, Ф. С. Непша // Цифровые технологии и платформенные решения для управления развитием электроэнергетики: сб. науч. тр. I Всерос. науч.-практ. конф., Севастополь, 23 марта 2023 г. / Сев. гос. ун-т. Севастополь, 2023. С. 107–113.
7. Программа для краткосрочного прогнозирования значений временного ряда часов максимальной пиковой нагрузки: а. с. 2021617818 Рос. Федерация / В. С. Журавлев, Е. А. Шаповалов. Оpubл. 19.05.2021.
8. Программа для определения оптимального профиля энергопотребления с учетом цен на электроэнергию и часов пиковой нагрузки: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021669137 Рос. Федерация / Н. А. Смирнов, О. Ю. Марьясин. Оpubл. 24.11.2021.
9. «EMAS.FORECAST»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021617882 Рос. Федерация / С. А. Шатунова; заявитель ООО «НБИ-ЛАБ». Оpubл. 20.05.2021.
10. Электронно-математическая модель (ЭММ) прогнозирования фактических часов пиковой нагрузки, устанавливаемых коммерческим оператором для определения объема фактического пикового потребления гарантирующего поставщика: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668587 Рос. Федерация / А. Н. Сагаян, Р. А. Травников. Оpubл. 10.10.2022.
11. ЦПУС.04 «Программа для краткосрочного и долгосрочного прогнозирования DA, WA, MA электрической нагрузки»: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666925 Рос. Федерация / С. В. Грибанов, А. В. Кычкин. Оpubл. 12.09.2022.
12. Программное обеспечение по прогнозированию часов пиковых нагрузок региона и объема потребления, а также формированию графика нагрузки на объектах производственно-хозяйственных нужд (включая СНЭ) в целях оптимизации стоимости покупной электрической мощности у энергоснабжающей организации: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023662409 Рос. Федерация / Л. С. Бируля, Т. П. Олиянчук, Д. Г. Роднев, Е. И. Смирнова, И. Н. Широков; заявители АО «Атом-энергопромсбыт», ПАО «Россети Центр и Приволжье». Оpubл. 07.06.2023.
13. Программа расчета прогнозных значений пиковых часов коммерческого оператора ОРЭМ: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618806 Рос. Федерация / С. Р. Сaitov, Н. Д. Чичирова, А. А. Филимонова; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский гос. энергетический ун-т». Оpubл. 28.04.2023.

14. Central limit theorem [Electronic Resource] // Wikipedia. – Mode of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution. – Date of access: 01.11.2023.
15. Rank Analysis and Ensemble Machine Learning Model for Load Forecasting in the Nodes of the Central Mongolian Power System / Т. Osgonbaatar, Р. Matrenin, М. Safaraliev, I. Zicmane, А. Rusina // *Inventions*. – 2023. № 8(114). P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/inventions8050114>.
16. Повышение точности прогнозирования генерации фотоэлектрических станций на основе алгоритмов k -средних и k -ближайших соседей / П. В. Матренин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 4. С. 305–321. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321>.
17. Оптимизация топологии сети с ВИЭ-генерацией на основе модифицированного адаптированного генетического алгоритма / А. М. Брамм [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 4. С. 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354>.
18. Румянцев, Ю. В. Определение насыщения трансформатора тока на основе использования искусственной нейронной сети / Ю. В. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 3. С. 233–245. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-233-245>.

Поступила 17.10.2023 Подписана в печать 19.12.2023 Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. Components of the Maximum Levels of Unregulated Prices. *JSC “Administrator of the Trading System”*. 2002–2023. Available at: <https://www.atsenergo.ru/results/market/svnc>. (accessed 01 November 2023) (in Russian).
2. Peak Hours. *JSC “Administrator of the Trading System”*. 2002–2023. Available at: <https://www.atsenergo.ru/results/market/calcfacthour> (accessed 01 November 2023) (in Russian).
3. Saitov S R., Karachurin B R., Sidorov M. V. (2022) Forecasting Electricity Consumption Peak Hours of Energy Supply Company Included in the Registry of Public Corporation ATSENERGO. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta = Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 14 (4), 59–68 (in Russian).
4. Voronin V. A., Nepsha F. S. (2023) Forecasting Peak Load Hours of Regional Power Systems Using Naive Models. *Smart Electrical Engineering*, (3), 111–124. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_3_111 (in Russian).
5. Maryasin O., Lukashov A., Smirnov N. (2022) Market Electricity Prices and Peak Load Hours Forecasting for a Region of the Russian Federation. *Upravlenie Bol'shimi Sistemami = Large-Scale Systems Control*, 99, 81–113. <https://doi.org/10.25728/ubs.2022.99.4> (in Russian).
6. Voronin V. A., Nepsha F. S. (2023) Forecasting Load Hours of the Regional Energy System Using Machine Learning Methods. *Tsifrovye Tekhnologii i Platformnyye Resheniya Dlya Upravleniya Razvitiem Elektroenergetiki: Sb. Nauch. Tr. I Vseros. Nauch.-Prakt. Konf., Sevastopol', 23 Marta 2023 Goda* [Digital Technologies and Platform Solutions for Managing the Development of the Electric Power Industry: Collection of Scientific Papers of the I All-Russian Scientific and Practical Conference, Sevastopol, March 23, 2023]. Sevastopol, 107–113 (in Russian).
7. Zhuravlev V. S., Shapovalov E. A. (2021) *A Program for Short-Term Forecasting of the Values of the Time Series of Hours of Maximum Peak Load*. Certificate of State Registration of a Computer Program No RU 2021617818 (in Russian).
8. Smirnov N. A., Maryasin O. Y. (2021) *A Program for Determining the Optimal Energy Consumption Profile, Taking into Account Electricity Prices and Peak Hours*. Certificate of State Registration of a Computer Program No RU 2021669137 (in Russian).
9. Shatunova S. A. (2021) *“EMAS.FORECAST”*. Certificate of State Registration of a Computer Program No RU 2021617882 (in Russian).

10. Sagayan A. N., Travnikov R. A. (2021) *An Electronic Mathematical Model (EMM) for Forecasting the Actual Peak Hours Set by a Commercial Operator to Determine the Volume of Actual Peak Consumption of a Guaranteeing Supplier*. Certificate of State Registration of a Computer Program No RU 2022668587 (in Russian).
11. Griбанov S. V., Kychkin A. V. (2022) *DPDM.04 "Program for Short-Term and Long-Term Forecasting of DA, WA, MA Electrical Load"*. Certificate of State Registration of a Computer Program No RU 2022666925 (in Russian).
12. Birulya L. S., Oliyanchuk T. P., Rodnev D. G., Smirnova E. I., Shirokov I. N. (2023) *Software for Forecasting Peak Hours of the Region and the Object of Consumption, as Well as for Formation of a Load Schedule at Production and Economic Facilities (including ESS) in Order to Optimize the Cost of Purchased Electrical Power from an Energy Supply Organization*. Certificate of State Registration of a Computer Program No RU 2023662409 (in Russian).
13. Saitov S. R., Chichirova N. D., Filimonova A. A. (2023) *The Program for Calculating the Forecast Values of Peak of the OREM Commercial Operator*. Certificate of State Registration of a Computer Program No RU 2023618806 (in Russian).
14. Normal Distribution. *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution (accessed 01 November 2023).
15. Osgonbaatar T., Matrenin P., Safaraliev M., Zicmane I., Rusina A. (2023) A Rank Analysis and Ensemble Machine Learning Model for Load Forecasting in the Nodes of the Central Mongolian Power System. *Inventions*, 8 (5), 114. <https://doi.org/10.3390/inventions8050114>.
16. Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Gamaley V. V., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A., Potachits Y. V. (2023) Improving of the Generation Accuracy Forecasting of Photovoltaic Plants Based on k -Means and k -Nearest Neighbors Algorithms. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (4), 305–321. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321> (in Russian).
17. Bramm A. M., Khalyasmaa A. I., Eroshenko S. A., Matrenin P. V., Papkova N. A., Sekatski D. A. (2022) Topology Optimization of the Network with Renewable Energy Sources Generation Based on a Modified Adapted Genetic Algorithm. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (4), 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354> (in Russian).
18. Rumiantsev Yu. V. (2023) Current Transformer Saturation Detection Method Based on Artificial Neural Network. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 66 (3), 233–245. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-233-245> (in Russian). Date of Access: 04.01.2024.

Received: 17 October 2023 Accepted: 19 December 2023 Published online: 31 January 2024

**Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова
НАН Беларуси объявляет конкурс 2024 года
на соискание премий имени академика А. В. Лыкова**

Премии имени выдающегося ученого, основателя всемирно известной белорусской научной школы по тепло- и массообмену академика Алексея Васильевича Лыкова (далее – Премии) присуждаются за научные работы, вносящие крупный вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований по проблемам переноса энергии и вещества, открытие и описание закономерностей явлений и процессов тепло- и массопереноса в природных и технических объектах, средах различного фазового состава при наличии фазовых и химических превращений, разнообразных внешних воздействий, составляющих основу новых высокоэффективных тепломассообменных технологий и оборудования для народного хозяйства.

Премии (две – одна отечественным ученым и одна международному коллективу авторов) будут присуждены Институтом тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (далее Институт) в канун открытия XVII Минского Международного форума по тепломассообмену (20 мая 2024 года).

Премия отечественным ученым присуждается отдельным лицам или группе сотрудников (не более трех), работающим в научных, научно-производственных организациях и вузах Республики Беларусь, – за определяющий вклад в выполнение выдвигаемой работы.

Премия международному коллективу авторов присуждается коллективам ученых зарубежных стран и Республики Беларусь (не более трех) – за вклад в развитие творческого наследия А. В. Лыкова, совместные основополагающие работы по проблемам тепло- и массопереноса.

Право выдвижения работ на соискание Премии предоставляется: академикам и членам-корреспондентам НАН Беларуси, ученым (научно-техническим) советам научных организаций и высших учебных заведений Республики Беларусь и зарубежных стран.

С Положением о Премиях можно ознакомиться на официальном веб-сайте Института <http://www.itmo.by/institute/news>.

Материалы с надписью «На соискание премии имени академика А. В. Лыкова» представляются до **20 марта 2024 года** в Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси по адресу: 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15, корпус 2, каб. 329.

Справки по тел.: 8 (017) 270-33-23 (Валентина Алексеевна Карелина)